

République algérienne démocratique et populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique



Université SAAD DAHLAB Blida-1
Institut d'Aéronautique et des études spatiales
Département de construction Aéronautique

Mémoire présenté en guise d'obtention du diplôme
de Master en Avionique intitulé :

Conception, modélisation, control et réalisation
d'un quadri-rotor à base d'Arduino.

Présenté par : **ABOURA Raziqa**

Proposé par : **CHERGANI Ahmed**

Année universitaire 2019/2020.

**Abstract:**

First, we will make the state of the art on the evolution of quadri-rotors. Then, the nonlinear dynamic model will be established in the general case and the latter will be approximated to obtain the linear case easy to use. The use of control techniques will be discussed. Likewise, a simulation under Matlab will be carried out for a quadri-rotor. The last step is devoted to the realization and assembly of the various components and the tests carried out using the appropriate software in particular the Arduino.

Résumé:

En premier lieu, on fera l'état d'art sur l'évolution des quadri-rotors. Ensuite, le modèle dynamique non linéaire sera établi dans le cas général et ce dernier sera approximé pour obtenir le cas linéaire facile à exploité. L'utilisation des techniques de contrôle sera discutée. De même une simulation sous Matlab sera effectuée pour un quadri-rotor. La dernière étape est consacré à la réalisation et le montage des divers composants et les tests effectués en utilisant les logiciels appropriés en particulier l'Arduino.

الملخص:

أولاً، سنقوم بعمل أحدث ما توصلت إليه التكنولوجيا في تطور المراوح الرباعية. بعد ذلك، سيتم إنشاء النموذج الديناميكي غير الخطي في الحالة العامة وسيتم تقريب الحالة الأخيرة للحصول على الحالة الخطية سهلة الاستخدام. سيتم مناقشة استخدام تقنيات التحكم. وبالمثل، سيتم إجراء محاكاة تحت Matlab لدوار رباعي. تم تخصيص الخطوة الأخيرة لتحقيق وتجميع المكونات المختلفة والاختبارات التي يتم إجراؤها باستخدام البرنامج المناسب على وجه الخصوص Arduino.



Remerciements

*Avant tout je tiens à remercier Allah sans qui son aide, ce travail n'aurait pu être achevé.
Je remercie ma famille pour leurs sacrifices, leur amour et pour tous ce qu'ils ont fait à fin
que je réussisse.*

Mes sincères remerciements vont :

*Aux membres du jury pour avoir assisté à ma soutenance et d'avoir examiné ce travail avec
attention.*

A mon promoteur Mr Chergani Ahmed

*Je voudrais également lui témoigner ma gratitude pour m'avoir confié ce sujet et assumé
l'encadrement de mon projet, l'intérêt qu'il a porté à ce travail, sa bienveillance, ses
discussions fructueuses et ses hautes qualités humaines qui ont constitué une aide précieuse
et m'ont permis de mener à terme ce travail.*

*Mr Kazed, Mr Dali et Mr Mahieddine pour leurs conseils et leurs disponibilités pour mener
ce travail à bon port.*

A tous les enseignants qui ont contribué à ma formation et mon apprentissage.

*Je remercie également tous mes amis pour leurs prières et encouragements et leurs soutiens
et leur aide.*

*Et enfin je tiens à remercier tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de
ce mémoire.*



Dédicaces

Je dédie ce travail à :

Ma chère mère et mon cher père (que dieu l'accueille dans son vaste paradis)

Mon frère et ma sœur.

*Tous ceux qui ont partagé avec moi les moments d'émotion lors de la
réalisation de ce travail.*

A tous ceux qui m'ont aidé et encouragé.

A tous ceux que j'aime.



Le sommaire

| | |
|----------------------|--|
| Résumé | |
| Remerciement | |
| Dédicace | |
| Liste des symboles | |
| Liste des figures | |
| Liste des tableaux | |
| Introduction général | |

Chapitre I

Etat de l'art sur les quadri-rotors

| | |
|--|-----------|
| I.1. Historique des quadri-rotors..... | 16 |
| I.2. Classification quadri-rotors..... | 17 |
| I.2.1. Les micro drones (μ UAV)..... | 18 |
| I.2.2. Les mini drones (MUAV)..... | 18 |
| I.2.3. Les drones tactiques..... | 19 |
| I.2.3.1. Drone à voilure fixe..... | 19 |
| I.2.3.2. Drone à voilure tournante..... | 19 |
| I.2.3.2. Drone combat UCAV..... | 20 |
| I.2.4. Les drones stratégiques..... | 20 |
| I.2.4.1. Drone MALE..... | 20 |
| I.2.4.2. Drone HALE..... | 20 |
| I.3. Règlementations quadri-rotors..... | 21 |
| I.3.1. En Algérie..... | 21 |
| I.3.2. Au Etats Unis. | 21 |
| I.3.3. En France..... | 21 |
| I.3.4. A Canada..... | 22 |
| I.3.5. Au Japon. | 22 |
| I.4. Application des quadri-rotors..... | 22 |
| I.5. Projets récent..... | 23 |

Chapitre II

Généralités et modélisation

| | |
|---|-----------|
| II.1. Introduction..... | 25 |
| II.2. Description du quadri-rotor..... | 25 |
| II.3. Mouvement du quadri-rotor..... | 26 |
| I.3.1. Mouvement de Lacet..... | 26 |
| I.3.2. Mouvement de Roulis..... | 26 |
| I.3.3. Mouvement de Tangage..... | 27 |
| I.3.4. Mouvement vertical..... | 27 |
| I.3.5. Mouvement horizontal..... | 28 |
| II.4. Dynamique du quadri-rotor..... | 29 |
| I.4.1. Définition des repères..... | 39 |



| | |
|---|----|
| I.4.2. La matrice de rotation..... | 30 |
| I.4.3. La vitesse angulaire..... | 31 |
| I.4.4. La vitesse linéaire..... | 31 |
| I.4.5. Les effets Physiques agissants sur le quadri-rotor..... | 32 |
| I.4.5.1. Les force..... | 32 |
| I.4.5.2. Les moments. | 33 |
| I.4.5.3. Les effets gyroscopiques..... | 33 |
| I.4.6. Développement du Modèle mathématique selon Newton-Euler..... | 34 |
| I.4.6.1. Equations de mouvement de translation..... | 35 |
| I.4.6.2. Equations de mouvement de rotation..... | 36 |
| I.4.7. La représentation d'état du système..... | 37 |
| I.4.8. La dynamique des rotors..... | 38 |
| I.4.9. Conclusion..... | 40 |

Chapitre III

Contrôle et Simulation

| | |
|---|-----------|
| III.1. Introduction..... | 41 |
| III.2. La commande PID..... | 41 |
| III.2.1. Proportionnel 'P'..... | 42 |
| III.2.2. Intégré 'I'..... | 42 |
| III.2.3. Dérivé 'D'..... | 43 |
| III.2.4. Le model 'state space'..... | 45 |
| III.3. La simulation en boucle ouverte. | 47 |
| III.4. La simulation en boucle fermée. | 49 |

Chapitre IV

Conception

| | |
|---|-----------|
| IV.1. Introduction..... | 59 |
| IV.2. Structure..... | 59 |
| IV.3. Moteurs Brushless..... | 61 |
| IV.3.1. Composition du moteur brushless..... | 62 |
| IV.3.2. Fonctionnement du moteur brushless simple..... | 62 |
| IV.3.3. Caractéristiques importantes des moteurs brushless sont en général..... | 63 |
| IV.3.4. Les avantage..... | 63 |
| IV.3.5. Les inconvénients. | 64 |
| IV.4. Contrôleurs de vitesse (ESC)..... | 64 |
| IV.4.1. Fonctionnement de la commande de vitesse électronique (ESC).... | 65 |
| IV.4.2. Fonction Protection..... | 66 |
| IV.4.3. L'objectif des commandes de vitesse électroniques (ESC)..... | 66 |
| IV.5. Batterie..... | 66 |
| IV.5.1. Les ACCUS LIPO..... | 66 |
| IV.5.2. Quelle est la signification des indications présentes sur les batteries ?..... | 67 |
| IV.5.3. Comment prendre soin de la batterie ?..... | 67 |
| IV.6. Hélice..... | 68 |



| | |
|--|-----------|
| IV.6.1. les hélices du quadri-rotor..... | 68 |
| IV.6.2. Les caractéristiques des hélices..... | 69 |
| I.V.6.3. Les matériaux qui composent les hélices..... | 70 |
| IV.7. MPU6050..... | 70 |
| IV.7.1. Brochage et description. | 71 |
| IV.7.2. Caractéristiques du MPU6050..... | 71 |
| IV.7.3. Protocole I2C..... | 72 |
| IV.7.4. Application de MPU6050..... | 73 |
| IV.8. Télécommande et récepteur..... | 73 |
| IV.8.1. La manette PS2..... | 73 |
| IV.8.1.1. Le joystick analogique..... | 74 |
| IV.8.2. Le nRF24L01 + PA + LNA. | 75 |
| I.V.8.2.1. La description détaillée. | 75 |
| IV.8.2.2. Les caractéristiques..... | 76 |
| IV.9. Logiciels..... | 77 |
| IV.9.1. Arduino..... | 77 |
| IV.9.1.1. Les caractéristiques techniques générales de l'Arduino nano..... | 78 |
| IV.9.1.2. Fonctionnement de la carte Arduino Nano..... | 79 |
| IV.9.1.3. Les avantages de l'Arduino Nano..... | 79 |
| IV.9.1.4. Les inconvénients de l'Arduino Nano..... | 79 |
| IV.9.1.5. Présentation de logiciel..... | 80 |
| IV.9.1.5.1. Correspondance..... | 80 |
| IV.9.1.6. La proche et l'utilisation du logiciel. | 80 |
| IV.9.1.7. Les boutons..... | 81 |

Chapitre V

Réalisation et tests

| | |
|--|-----------|
| V.1. Introduction..... | 83 |
| V.2. Montage | 83 |
| V.2.1. Teste de MPU6050..... | 83 |
| V.2.2. Test du moteur. | 85 |
| V.2.3. Montage de deux moteurs..... | 87 |
| V.2.4. montage de MPU6050 avec les deux moteurs..... | 87 |
| Conclusion général | 89 |
| Bibliographie..... | 90 |



Liste des symboles

| | | |
|-----------------|---|--|
| R_b | : | Repère lié au quadri-rotor. |
| R_e | : | Repère lié à la terre. |
| x_b | : | Axe x du repère quadri-rotor. |
| y_b | : | Axe y du repère quadri-rotor. |
| z_b | : | Axe z du repère quadri-rotor. |
| x_e | : | Axe x du repère terrestre. |
| y_e | : | Axe y du repère terrestre. |
| z_e | : | Axe z du repère terrestre. |
| φ | : | Angle de roulis. |
| θ | : | Angle de tangage. |
| ψ | : | Angle de lacet. |
| H_z | : | La matrice de rotation d'angle ψ . |
| H_y | : | La matrice de rotation d'angle θ . |
| H_x | : | La matrice de rotation d'angle φ . |
| H | : | La matrice de rotation. |
| Ω | : | La vitesse angulaire dans le repère fixe. |
| Ω_1 | : | La vitesse angulaire dans le repère fixe selon l'axe x_e . |
| Ω_2 | : | La vitesse angulaire dans le repère fixe selon l'axe y_e . |
| Ω_3 | : | La vitesse angulaire dans le repère fixe selon l'axe z_e . |
| $\dot{\varphi}$ | : | La vitesse angulaire dans le repère mobile selon l'axe x_b . |
| $\dot{\theta}$ | : | La vitesse angulaire dans le repère mobile selon l'axe y_b . |
| $\dot{\psi}$ | : | La vitesse angulaire dans le repère mobile selon l'axe z_b . |
| V | : | La vitesse linéaire. |
| V_x^e | : | La vitesse linéaire dans le repère fixe selon l'axe x_e . |
| V_y^e | : | La vitesse linéaire dans le repère fixe selon l'axe y_e . |
| V_z^e | : | La vitesse linéaire dans le repère fixe selon l'axe z_e . |
| V_x^b | : | La vitesse linéaire dans le repère mobile selon l'axe x_b . |



- V_y^b : La vitesse linéaire dans le repère mobile selon l'axe y_b .
 V_z^b : La vitesse linéaire dans le repère mobile selon l'axe z_b .
 P : Le poids du quadri-rotor.
 m : La masse du quadri-rotor.
 g : La gravité.
 F_p : La force de portance.
 f_i : La force de portance produite par la rotation d'hélice i .
 b : Le coefficient de portance.
 T_h : Les forces de trainée.
 d : Le coefficient de trainée.
 K_{ft} : Le coefficient de trainée de translation.
 M_x, M_y : Moment dus aux forces de poussée.
 M_z, M_a : Moments dus aux forces de trainée.
 K_{fa} : Le coefficient des frottements aérodynamiques.
 M_{gh} : Le moment gyroscopique des hélices.
 J_r : La matrice d'inertie de chaque rotor.
 M_{gm} : Le moment gyroscopique dû aux mouvements de quadri-rotor.
 J : La matrice d'inertie du système diagonale
 ζ : Le vecteur de position du quadri-rotor.
 $S(\Omega)$: La matrice antisymétrique.
 F_f : La force totale générée par les quatre rotors.
 F_t : La force de trainée.
 M_f : Moment provoqué par les forces de poussée et de trainée.
 M_a : Moment résultant des frottements aérodynamiques.
 τ_i : Le couple fournit par le moteur.
 Q_i : Le couple résistant généré par le rotor i .
 $\dot{\omega}_i$: L'accélération angulaire du moteur
 i_a : Le courant produit par la batterie.
 K_{mot} : La constante du moteur.
 ω : La vitesse angulaire du moteur.



R_{mot} : La résistance du moteur.

L_{mot} : L'inductance du moteur.



Listes des figures

| | |
|--|----|
| Figure.I.1. Otto Lilienthal, pionnier de l'aviation (vol à voile)..... | 16 |
| Figure.I.2. Breguet-Richet Gyroplane No.1 helicopter..... | 16 |
| Figure.I.3. Hélicoptère quadri-rotor de De Bothezat, 1923..... | 17 |
| Figure.I.4. L'Ehmichen hélicoptère N°2..... | 17 |
| Figure.I.5. Micro drone Tello Ryze Dji..... | 18 |
| Figure.I.6. Eachine H8 mini mode sans tête..... | 19 |
| Figure.I.7. Drone à voilure fixe..... | 19 |
| Figure.I.8. Drone à voilure tournante..... | 19 |
| Figure.I.9. Drone combat Neuron..... | 20 |
| Figure.I.10. Drone MALE Algérien..... | 20 |
| Figure.I.11. Drone HALE..... | 21 |
| Figure.II.1. Sens de rotation du quadri-rotor..... | 25 |
| Figure.II.2. Illustration du mouvement de lacet..... | 26 |
| Figure.II.3. Illustration du mouvement de Roulis..... | 27 |
| Figure.II.4. Illustration du mouvement de Tangage..... | 27 |
| Figure.II.5. Illustration du mouvement vertical..... | 28 |
| Figure.II.6. Mouvement horizontal (translation)..... | 28 |
| Figure.II.7. Configuration du quadri-rotor..... | 29 |
| Figure.II.8. Schéma d'un moteur à CC..... | 38 |
| Figure.III.1. Illustration de l'action proportionnelle sous Matlab, la réponse à l'échelon..... | 42 |
| Figure.III.2. Illustration de l'action proportionnelle intégrale sous Matlab, la réponse à l'échelon..... | 43 |
| Figure.III.3. Illustration de l'action proportionnelle intégrale dérivée sous Matlab, la réponse à l'échelon..... | 44 |
| Figure.III.4. Schéma de bloc du régulateur PID..... | 44 |
| Figure.III.5. Représentation d'état matricielle..... | 45 |
| Figure.III.6. Schéma bloc d'un system en boucle ouverte..... | 49 |
| Figure.III.7. Schéma bloc d'un system en boucle fermée..... | 49 |
| Figure.III.8. La réponse de la sortie x11..... | 50 |
| Figure.III.9. La réponse de la sortie x12..... | 50 |
| Figure.III.10. La réponse de la sortie x4..... | 51 |
| Figure.III.11. La réponse de la sortie x3..... | 51 |
| Figure.III.12. La réponse de la sortie x11..... | 52 |
| Figure.III.13. La réponse de la sortie x12..... | 52 |
| Figure.III.14. La réponse de la sortie x4..... | 53 |
| Figure.III.15. La réponse de la sortie x3..... | 53 |
| Figure.III.17. La réponse de la sortie x2..... | 54 |
| Figure.III.18. La réponse de la sortie x6..... | 54 |
| Figure.III.19. La réponse de la sortie x1..... | 55 |
| Figure.III.20. La réponse de la sortie x5..... | 55 |
| Figure.III.21. La réponse de la sortie x2..... | 56 |
| Figure.III.22. La réponse de la sortie x6..... | 56 |
| Figure.III.23. La réponse de la sortie x1..... | 57 |
| Figure.III.24. La réponse de la sortie x5..... | 57 |
| Figure IV.1. La base supérieure..... | 59 |



| | |
|--|-----------|
| Figure IV.2. La base inferieure..... | 59 |
| Figure IV.3. Le bras Blanc et rouge | 60 |
| Figure IV.4. Une vis..... | 60 |
| Figure IV.5. Assemblage des pièces..... | 60 |
| Figure IV.6. Moteur brushless RCX 1804-2400 kv..... | 61 |
| Figure IV.7. Moteur brushless..... | 62 |
| Figure IV.8. Fonctionnement du moteur brushless (sans balais)..... | 63 |
| Figure IV.9. ESC Brushless..... | 64 |
| Figure IV.10. Les composants de l'ESC..... | 65 |
| Figure IV.11. Batterie Lipo..... | 66 |
| Figure IV.12. Les chiffres de la batterie Lipo..... | 67 |
| Figure IV.13. Sac de stockage pour Lipo..... | 67 |
| Figure IV.14. Hélice d'un moteur Bruchless..... | 68 |
| Figure IV.15. Hélice à quatre, trois, deux pales..... | 68 |
| Figure IV.16. MPU6050..... | 70 |
| Figure IV.17. Protocole I2C..... | 72 |
| Figure IV.18. Manette PS2..... | 73 |
| Figure IV.19. Description de la manette PS2..... | 74 |
| Figure IV.20. Joystick analogique..... | 74 |
| Figure IV.21. Le diagramme de joystick..... | 75 |
| Figure IV.22. Le nRF24L01 + PA + LNA..... | 75 |
| Figure IV.23. Carte Arduino Nano V3.0..... | 78 |
| Figure IV.24. Présentation des parties principales du logiciel..... | 80 |
| Figure IV.25. Contenu du menue ' fichier'..... | 81 |
| Figure IV.26. Présentation des boutons..... | 81 |
| Figure.V.1. MPU6050 avec ces deux broches..... | 83 |
| Figure.V.2. La soudure de la broche droite avec le capteur..... | 84 |
| Figure.V.3. Les connexions entre la carte Arduino et le MPU6050..... | 84 |
| Figure.V.4. Resultat de test en processing..... | 85 |
| Figure.V.5. Branchage l'ESC avec le moteur et la carte arduino..... | 86 |
| Figure.V.6. Les connexions entre le joystick avec la carte arduino..... | 86 |
| Figure.V.7. Le montage après le lancement du programme..... | 86 |
| Figure.V.8. Les connexions entre les deux joystick et la carte arduino..... | 87 |
| Figure.V.9. cablage du 2éme joystick avec la carte arduino et le 2éme moteur..... | 87 |
| Figure.V.10. Le montage avant de lacer le programme | 87 |
| Figure.V.11. le placement du MPU6050..... | 88 |



Liste des tableaux

| | |
|---|----|
| Tableau I.1. les applications des drones..... | 22 |
| Tableau III.1. Les paramètres du quadri-rotor..... | 48 |
| Tableau III.2. Les fonctions de transferts..... | 49 |
| Tableau IV.1. Brochage de MPU6050..... | 71 |
| Tableau IV.2. Les caractéristiques l'Arduino Nano..... | 78 |



Introduction général

Les systèmes avioniques jouent un rôle primordial dans la vie actuelle de l'humanité. Parmi ces systèmes on cite : les avions, les hélicoptères, . . . etc. Les applications de ces systèmes quand ils sont pilotés par un pilote à bord sont multiples, entre autre on trouve : le transport des voyageurs, de la marchandise et des troupes . . . etc. Cependant certaines applications exigent que l'engin volant doive être doté d'une certaine autonomie ou d'une autonomie totale. Ce sont les applications qui sont considérées comme pénibles physiquement pour l'équipage, ou ennuyeuses, sale et dangereuses . . . etc. Le domaine de l'aviation a connu la naissance d'une nouvelle génération des engins volants afin d'accomplir la réalisation de ce type d'applications. Ces engins volants s'appellent drones.

Les drones ou UAV (Unmanned Aerial Vehicle) sont actuellement très utiles dans plusieurs secteurs civils ou militaires, cette utilité encourage les chercheurs beaucoup plus à développer des outils d'aide pour servir les utilisateurs à contrôler et piloter leurs engins volants d'une manière robuste.

L'objectif

L'objectif principal de ce projet est de réaliser un quadri-rotor, piloté via une manette PS2. Dans ce cadre d'idée, le contrôleur choisis est de type PID. C'est le régulateur le plus utilisé dans l'industrie où ses qualités de correction s'appliquent à de multiples grandeurs physiques.

Pour d'atteindre l'objectif fixé, on a suivi un plan de travail composé de cinq chapitres structurés selon l'ordre suivant :

Chapitre 1 : dans ce chapitre, on présentera l'état d'art sur les quadri-rotor, un bref historique, on décrira une classification des systèmes aériens selon la taille : les mini drones et les micros drones, les drones tactiques, les drones stratégiques. Aussi on décrira la loi applicable aux drones dans certains pays. A la fin, on donne le domaine d'application des quadri-rotor et les projets récents.

Chapitre 2 : le deuxième chapitre est consacré à la modélisation dynamique du quadri-rotor, d'abord on fait une description de ce système. Puis, on met en évidence la modélisation dynamique du quadri-rotor. Enfin, on donne le modèle d'état puis on simplifie le modèle afin de faciliter sa commande.

Chapitre 3 : le troisième chapitre est consacré à le control par la commande PID et la simulation, on utilisant l'environnement Matlab.

Chapitre 4 : Le quatrième chapitre est une explication approfondie sur le matériel utilisé pour construire le quadri-rotor.

Chapitre 5 : Dans ce chapitre nous avons détaillé les différentes étapes de la réalisation du quadri-rotor, les premiers tests de chaque composant, l'emplacement des différentes cartes électroniques réalisées.

A la fin on conclut le travail réalisé dans ce mémoire.



I. 1. Historique des quadri-rotors

"L'idée d'un véhicule qui pourrait se soulever à la verticale du sol, et planer immobile dans l'air, est probablement née dans le même temps où l'homme rêvait de voler" c'est ce qu'a dit Igor Ivanovitch Sikorsky l'un des pionniers de l'aviation.



Figure I.1. Otto Lilienthal, pionnier de l'aviation (vol à voile)

Le 29 septembre 1907, le premier hélicoptère habité à réussir une ascension, bien qu'avec l'assistance au sol, prend son envol à Douai, en France. Il a été construit par les frères Louis et Jacques Breguet en association avec le professeur Charles Richet. Ils l'appelaient Gyroplane. Les autorités divergent quant à la date du premier vol de la machine Breguet à Douai, les 24 août et 19 septembre 1907, avec une égale assurance, à cette occasion, l'avion s'est élevé à environ 0,60 m. Le test a eu lieu le 29 septembre à environ 1,50 m. Des essais similaires ont permis d'atteindre des hauteurs similaires, mais l'avion Breguet-Richet n'était ni contrôlable ni orientable dans un plan horizontal.[1]

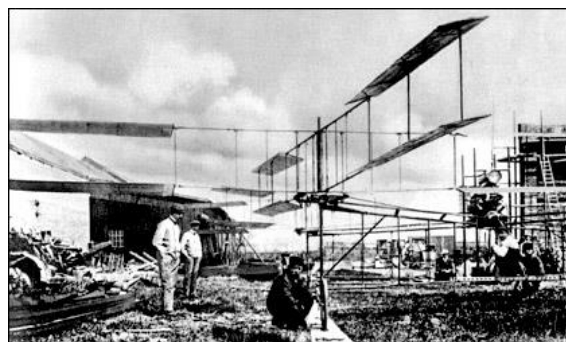


Figure I.2. Breguet-Richet Gyroplane No.1 helicopter

En janvier 1921, l'US Army Air Service passe un contrat avec George De Bothezat pour développer un appareil à décollage vertical, il sera le premier à faire voler un appareil quadri-rotor. Il réussit son premier vol en octobre 1922 et réalise un vol de 1min 42s à 1.8m du sol le 18 octobre 1922. Le 19 janvier 1923, l'appareil emporte deux personnes à 1.2m de sol. De



nombreux vols furent effectués en 1923 mais l'appareil ne s'élèvera pas au-dessus de cinq mètres et l'armée mettra fin au contrat.[2]



Figure I.3. Hélicoptère quadri-rotor de De Bothezat, 1923

Le 24 mai 1924, Étienne Oehmichen effectue à Arbouans le premier kilomètre en circuit fermé en hélicoptère avec son quadri-rotors N°2 décollage et atterrissage à la verticale. Les quadri-rotors à axe vertical se répartissent par deux de chaque côté du fuselage tandis que cinq petites hélices assuraient la stabilité horizontale, complétées par une hélice de direction et deux hélices de propulsion alimentées par un moteur de 88 kW. C'est le premier record homologué pour un 'hélicoptère' par la fédération aéronautique internationale. Il développe en tout sept appareils jusqu'à 1937.[3]

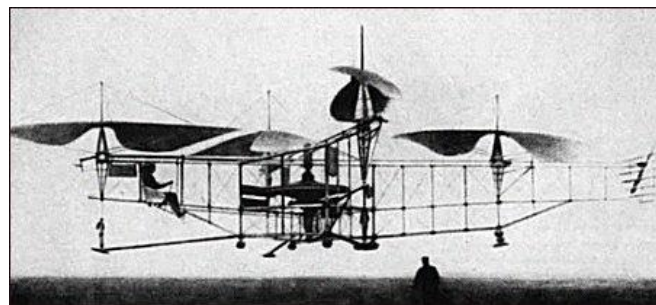


Figure I.4. L'Oehmichen hélicoptère N°2

Aujourd'hui, des quadri-rotors sont principalement proposés comme maquette télécommandées, appelés 'Drone'

I. 2. Classification quadri-rotors [4]

Il n'existe pas une façon unique de classer les drones car ils peuvent être classés selon plusieurs critères : autonomie, portés, altitude, mission, system de contrôle etc. Cependant, pour des raisons de sécurité dans l'espace aérien national, plusieurs pays se sont



penchés sur la classification de ces drones. Le Royaume-Uni et l'Australie les ont répertoriés en deux groupes basés sur leur masse. Les Etats-Unis ont proposé une répartition en cinq catégories : micro, mini, tactique, MALE et HALE.

La famille des drones est classifiée par taille comme suit :

- ➔ Les mini et micro drones.
- ➔ Les drones tactiques, lent ou rapides, à voilure fixe ou tournante appelé TUAV (Tactical Unmanned Air Vehicule).
 - Les drones combats, appelés UCAV (Unmanned Combat Air Vehicule).
- ➔ Les drones strategiques « à hauteur enddurances » .
 - Les drones volant à moyene altitude et de grand autonomie appelés MALE (Meduim Altitude Long Endurance).
 - Les drones volant à haute altitude et de grand autinomie appelés HALE (High Altitude Long Endurance).

I. 2.1. Les micro drones (μ UAV)

Le terme micro drone peut être trompeur, si on le lit au premier sens du terme. Il ne s'agit pas de drones d'une taille micrométrique, mais des drones ayant des tailles variant du centimètre à quelques dizaines de centimètres, ils pèsent environ 50 grammes, pour une vitesse de croisière de l'ordre de 50 km/h, une autonomie d'une vingtaine de minutes et un rayon d'action d'une dizaine de kilomètre.



Figure I.5. Micro drone Tello Ryze Dji

I. 2.2 Les mini drones (MUAV)

Ce sont des drones légers et de taille réduite (jusqu'à quelque kilomètre et d'une envergure jusqu'à 1 à 2 mètres), ils ont une autonomie relativement faible (de 10 à 30 minutes), et généralement utilisés pour l'observation de zones difficiles à l'accès.



Figure I.6. Eachine H8 mini mode sans tête

I. 2.3 Les drones tactiques

Ayant un rayon d'action jusqu'à plus de cent kilomètre, leur poids peu largement dépasse la tonne. Ils nécessitent une empreinte logistique importante et parfois des installations aménagées. Leur endurance peut atteindre 8 heures et leurs charges utiles multifonctionnelles.

I. 2.3.1 Drone à voilure fixe

Dans le cas d'un appareil « à voilure fixe », la voilure est la surface assurant la portance d'un aérodyne par déflexion d'une masse d'air, due à son mouvement.



Figure I.7. Drone à voilure fixe

I. 2.3.2 Drone à voilure tournante

Ce sont des drones dont la sustentation est assurée par la rotation d'un ou plusieurs rotors.





Figure I.8. Drone à voilure tournante

I. 2.3.4 Les drones combat UCAV

Il s'agit bien sûr des drones à vocation offensive, dont la charge utile comprend des armements – le plus souvent, des missiles – afin d'effectuer des missions d'attaque au sol voire, à plus long terme de défense aérienne et de police du ciel.



Figure I.9. Drone combat Neuron

I. 2.4 Les drones stratégiques

I. 2.4.1 Drone MALE

L'altitude de vol est pour cette catégorie, comprise entre 5000 et 12000 mètres, ce qui permet de parcourir jusqu'à 1000 km, à des vitesses relativement faibles, de 220 à 360 km/h. la masse peut cette fois atteindre 3.5 tonnes, et l'envergure est généralement comprise entre 10 et 20 mètres.



Figure I.10. Drone MALE Algérien

I. 2.4.2 Drone HALE

On atteint dans cette catégorie les dimensions d'un avion civil pour des autonomies de plusieurs milliers de kilomètres (10 000 km et plus), parcourues en volant largement au-dessus des trafics aériens courants, tant civils que militaires (jusqu'à 20000 m d'altitude).



Figure I.11. Drone HALE

I. 3. Règlements quadri-rotors [5]

I. 3.1. En Algérie

La loi applicable aux drones inclue des dispositions relatives à la fois au droit civil et au droit pénal. D'autre part, le pilotage des drones est également encadré par le code des transports et le code de l'aviation civil.

Tant pour la sécurité des aéronefs que celle des personnes au sol, ou encore pour le respect de la vie privée et du droit à l'image, il est très important que les pilotes connaissent et appliquent ces textes.

I. 3.2. Eu Etats Unis

Depuis mars 2016, il est obligatoire d'enregistrer son drone auprès de la Fédéral Aviation Administration afin de voler sur le sol américain. Ainsi, tout propriétaire de drone dont le poids est compris entre 250 g et 25 kg obligé de faire immatriculer ses appareils. L'absence de preuve d'enregistrement pouvant mener à des amendes voir des poursuites pénales, il est vital de le faire.

« Le procédé est simple et peu onéreux : il s'agit d'un formulaire à remplir en ligne qui s'accompagne de frais standard de 5 \$. L'immatriculation est valable 3 ans pour nombre illimité d'appareils [FAA.GOV].

I. 3.3. En France

Très règlementée. L'utilisation d'un drone est interdite dans certaines zones et dans certaines circonstances. Et il est ainsi capital de savoir exactement où l'on peut faire voler un drone.

Voici les 10 commandements au pilotage d'un drone :

1. Evitez de survoler les personnes et les véhicules.
2. Respecter les hauteurs maximales de vol.
3. Gardez votre drone à vue d'œil et ne l'utilisez pas la nuit.
4. S'abstenir de survoler un espace public en agglomération.
5. Se garder de voler à proximité des aérodromes.
6. Eviter de survoler les sites sensibles ou protégés.



7. Respectez la vie privée d'autrui.
8. Gardez-vous de diffuser les prises de vue sans l'accord des personnes concernées et n'en faites pas une utilisation commerciale.
9. Vérifiez dans quelles conditions vous êtes assuré pour la pratique de l'aéromodélisme.
10. En cas de doute, renseigner vous.

I. 3.4. A Canada

Au Canada, en matière de sécurité, transports canada est responsable des appareils civils. La sécurité requise est la même que celles des aéronefs habités, un certificat d'opérations aériens spécialisées (COAS) est nécessaire et pour faire voler un drone. Certaines entreprises développent des pratiques opérationnelles sécuritaires et encadrent les pilotes de drones dans leurs activités commerciales. Il existe des centres de formation aéronautique (CQFA), pour le pilotage de drones légers de moins de 25 kg.

I. 3.5. Au Japon

En 2015 le bureau de l'activation civil du Japon à annoncer que 'UA/Drone' (désigne tout avion, giravion, planeur ou dirigeable ne pouvant accueillir aucune personne à bord et pouvant être piloté à distance ou automatiquement)

- Ne devrait vole pas à proximité ou au-dessus les aéroports.
- Ne devrait survolent pas plus de 150 mètres au-dessus du sol / de la surface de l'eau.
- Ne devrait survolent pas les zones urbaines et les banlieues (de sorte que seule la zone rurale est autorisée.) UA / drone ne doit pas voler à proximité d'immeubles ou d'installations importantes du pays, y compris d'installations nucléaires.

UA / drone doit suivre à la lettre la loi japonaise sur la radio.

I. 4. Application des quadri-rotors

L'avènement du drone quadri-rotor a permis la création de nouvelles méthodes de travail. Ces drones sont à présent utilisés par des journalistes, des réalisateurs et des photographes pour réaliser des prises de vue aériennes inédites mais également par les services de police, les pompiers, gendarmerie ... afin de réaliser une prise d'informations préalables à des interventions en hauteur et délicates.

Les drones peuvent être faire des centaines d'applications, parmi ceux-ci :

| Domaine | Services |
|--------------------------|---|
| Surveillance | Infrastructures Entrepôts / Bâtiments, Inventaire des stocks, Trafic routier, Transport de matières dangereuses / Frontières, Territoire réglementée. |
| Sécurité incendie | Détection de feux de forêt, Diagnostic d'évolution des flammes. |
| Inspection | Ouvrage d'art, réseaux de communication, Thermographie, Eoliennes Panneaux photovoltaïques, Barrages/ Toiture. |



| | |
|---------------------------|--|
| Cartographie | Cadastre, travaux publics, Géo-référencement. |
| Santé / Urgence | Transports de matériels d'urgence, Transports de médicament. |
| Environnement | Catastrophes naturelles, Gestion de l'eau, Détection de flore, Comptage/détection de faux |
| Artistique / Media | Mise en valeur immobilier/ monuments, Télévision / Cinéma Communication / Marketing, Mise en valeur régions touristique. |
| Agriculture | Surveillance des zones agricoles, Analyse des cultures, Analyse des besoins en engrais, Détection des maladies, Détection des pieds manquants. |
| Topographie | Mines et carrières, Contrôle des stocks, terrassement, Ortho-photo. |
| Loisirs / Sport | Suivi des événements sportifs, Concert / Manifestations, Mise en place tactiques. |

Tableau.I.1. les applications des drones.

I. 5. Projet récent [6]

Pour bien comprendre l'évolution incroyable des drones en seulement quelques années, voici un calendrier, nécessairement succinct, des faits majeurs survenus dans le monde des nouveaux objets volants.

- ➔ **2007** : Chris Anderson lance la communauté DIYdrones.com (Do It Yourself Drones) qui rassemble les fans de robotique appliquée aux quadricoptères. La communauté lance un chipset d'autopilotage nommé Ardu Pilot, sur le modèle « open source » des logiciels libres. Dix ans plus tard DIYdrones comptera... 88 000 membres.
- ➔ **janvier 2010** : Parrot dévoile l'AR. Drone au CES Las Vegas. Le grand public et les universités peuvent enfin s'offrir un drone à un prix raisonnable, 299€ (soit trois fois moins qu'un drone en pièces détachées)
- ➔ **2011** : Chris Anderson fonde 3Drobotics
- ➔ **2012** : l'étudiant chinois Franck Wang crée Da Jiang Innovation à Shenzhen avec l'aide de l'argent emprunté à l'un de ses professeurs – Une dizaine de mini-drones vole en essaim dans le labo Suisse de Raphaël de Andreis
- ➔ **juin 2013** : un drone franchit le Bosphore soit une distance de 1,4 km – Décembre 2013 : Jeff Bezos rend public le projet de livraison par drone Amazon Prime Air.
- ➔ **juin 2014** : Google lance son projet de Drone « Project Wing » avec des vols expérimentaux de livraison de nourriture et de médicaments effectués dans le Queensland en Australie.
- ➔ **2014** : un drone sponsorisé par Sony vole à 6000 m d'altitude lors d'un vol d'exception (alors que la législation n'autorise que 150 m maximum).



- ➔ **2015** : un drone piloté par le parti-pirate survole un meeting de la chancelière Angela Merkel.
- ➔ **mai 2015** : un drone atterrit suite à une erreur de pilotage sur la pelouse de la maison blanche
- ➔ **2015** : des drones non identifiés survolent des centrales nucléaires et l'Elysée
- ➔ **janvier 2016** : le constructeur chinois Ehang, qui avait réussi l'année précédente son projet participatif sur Indiegogo, dévoile au CES Las Vegas l'Ehang 184, le premier drone capable de transporter un humain. Derrick Xiong, co-fondateur et directeur marketing explique deux ans plus tard que le cap des 30 appareils et mille vols avec humain à bord a été franchi. Et les autorités de l'aviation civile de Dubai ont donné leur feu vert pour les expérimentations...
- ➔ **2016** : premières livraisons de vaccins et médicaments par les drones Matternet en Afrique
- ➔ **2017** : la startup américaine Matternet devient la première autorisée à mettre en place un service de logistique aérienne au-dessus de zones habitées en Suisse, en partenariat avec la Poste locale
- ➔ **juin 2018** : Greenpeace fait s'écraser un drone appelé « Superman » sur une centrale nucléaire française à... afin d'en dénoncer la vulnérabilité
- ➔ **août 2018** : le président vénézuélien est la cible de deux drones DJI Matrice 100 porteurs de 4 kilos d'explosifs chacun. L'attentat échoue mais blesse 7 personnes.



II. 1. Introduction

Dans le but de comprendre le modèle du quadri-rotor formé des équations de mouvement, de translation, et de rotation, il est nécessaire de parler d'abord de la façon par laquelle ce dernier est mis en mouvement.

Un quadri-rotor est formé de quatre hélices, tournant chacune à l'aide d'un moteur, et d'un couple d'engrenages qui sert à diminuer la vitesse de rotation, et par la suite à augmenter le couple produit. Il est défini dans l'espace par six degrés de liberté (6 DDL) [7]. Ces six degrés doivent être commandés à l'aide de quatre déclencheurs seulement, donc c'est un système sous actionné (le nombre des entrées inférieure au nombre des sorties).

La modélisation d'un quadri-rotors nécessite des compromis qui satisferont à la fois l'aspect théorique du modèle mathématique toute en gardant une robustesse dans la modélisation dynamique.

II. 2. Description du quadri-rotor

Le quadri-rotors ou quadri-coptères sont des véhicules aériens sans pilote capables de décoller et d'atterrir verticalement (VTOL). La maniabilité est haute. Bien que les systèmes de contrôle soient complexes, ils sont structurellement simples. Il a quatre rotors et les rotors sont placés à égale distance du centre de masse quadri-rotor.

Les quadri-rotors utilisent généralement deux paires d'hélices à pas fixe identique, deux dans le sens horaire (CW) et deux dans le sens antihoraire (CCW). Ces derniers agissent une variation indépendante de la vitesse de chaque rotor pour obtenir un contrôle. En modifiant la vitesse de chaque rotor, il est possible de générer spécifiquement une poussée totale souhaitée, localiser le centre de poussée latéralement et longitudinalement, et pour créer le couple total souhaité, ou force de rotation.

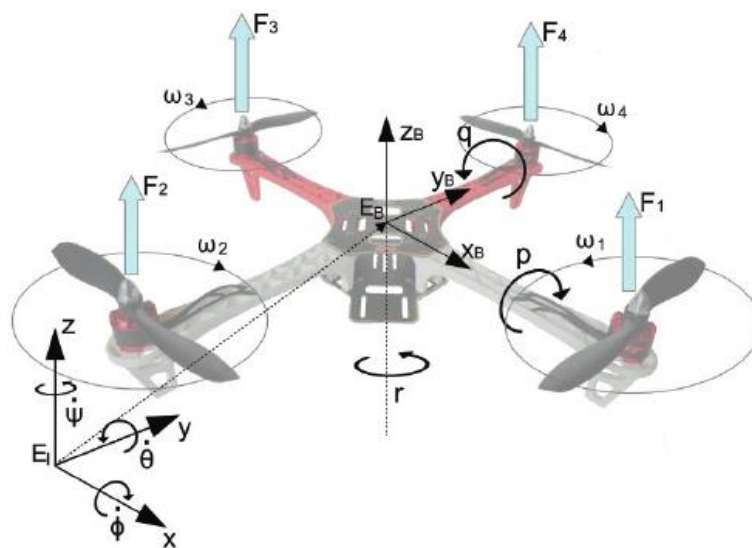


Figure II.1. Sens de rotation du quadri-rotor



II. 3. Mouvements du quadri-rotor [8]

Le quadri-rotor est un giravion dont le vol est basé sur la rotation de deux paires de rotors opposés. Comme le montre la figure 1, le mouvement différent du quadri-rotor est créé par une différence de vitesse des rotors. Si la vitesse du rotor 1 (ou 2) diminue et que la vitesse du rotor 3 (ou 4) augmente, alors le mouvement de roulis (ou de tangage) est créé et le quadri-rotor se déplace le long de l'axe y ou de l'axe x .

Les cinq mouvements possibles du quadri-rotor sont détaillés dans la suite.

II. 3.1. Mouvement de Lacet

Le mouvement de Lacet sert à tourner le quadri-rotor sur lui-même, celui-ci en rotation vers la droite ou vers la gauche, on va augmenter la vitesse d'une paire de moteur sur le même axe tout en diminuant les moteurs du 2^{ème} axe.

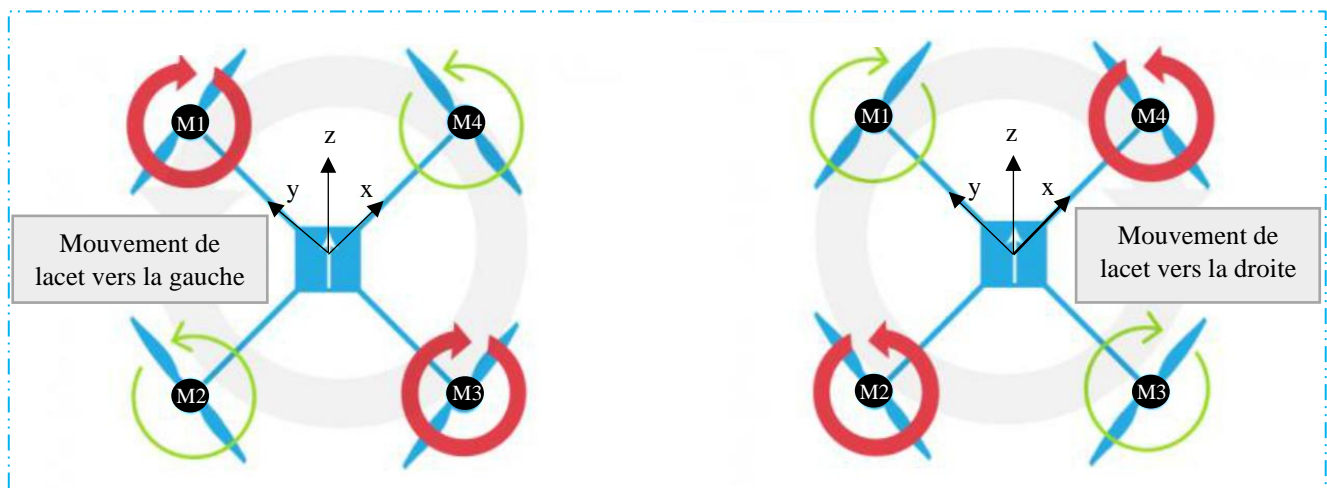


Figure II.2. Illustration du mouvement de lacet.

II. 3.2. Mouvement de Roulis

Le mouvement de Roulis est couplé avec un mouvement de translation selon l'axe (y). Pour incliner vers la gauche, on va diminuer les moteurs de gauche M1 et M2 et augmenter ceux de droite M3 et M4. Inversement pour incliner vers la droite.

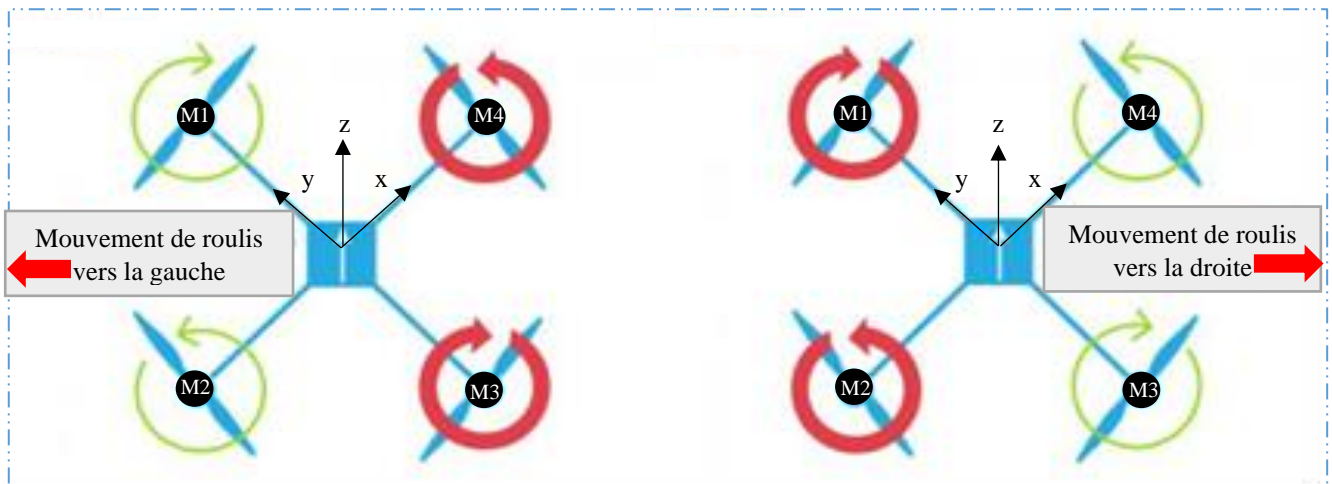


Figure II.3. Illustration du mouvement de Roulis.

II. 3.3. Mouvement de Tangage

Le mouvement de Tangage est couplé avec un mouvement de translation selon l'axe (x). Pour avancer, on va diminuer la vitesse des moteurs avant et augmenter la vitesse des moteurs arrière et inversement pour reculer.

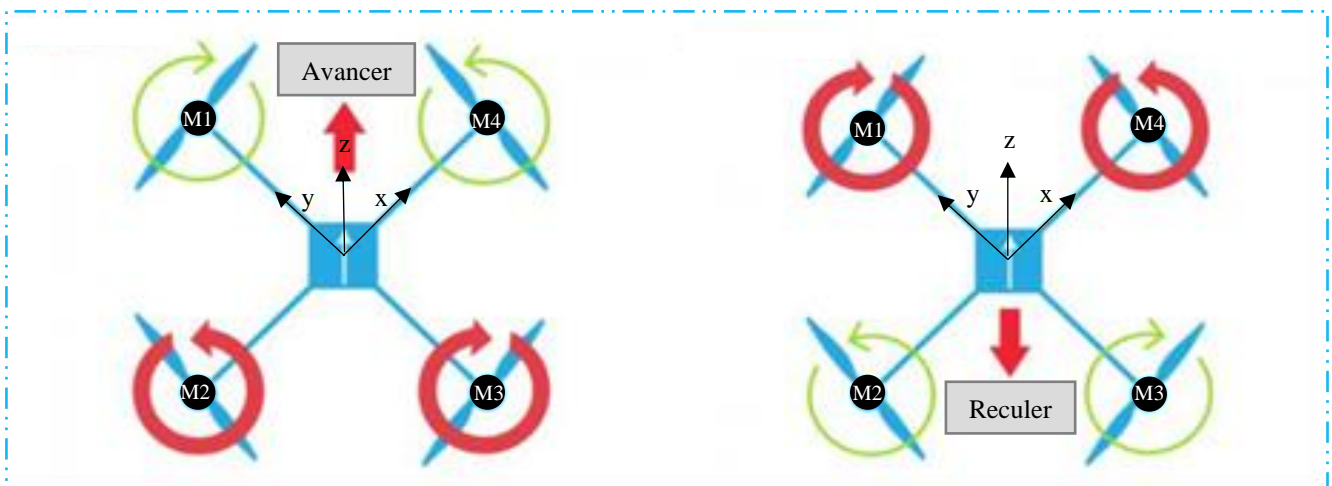


Figure II.4. Illustration du mouvement de Tangage.

II. 3.4. Mouvement vertical (monter / descendre)

Pour monter, on augmente la vitesse des moteurs simultanément, tous les moteurs tournent au même régime et inversement pour descendre, c'est la commande des gaz.

Pour un vol stationnaire on applique une vitesse moyenne de rotation.

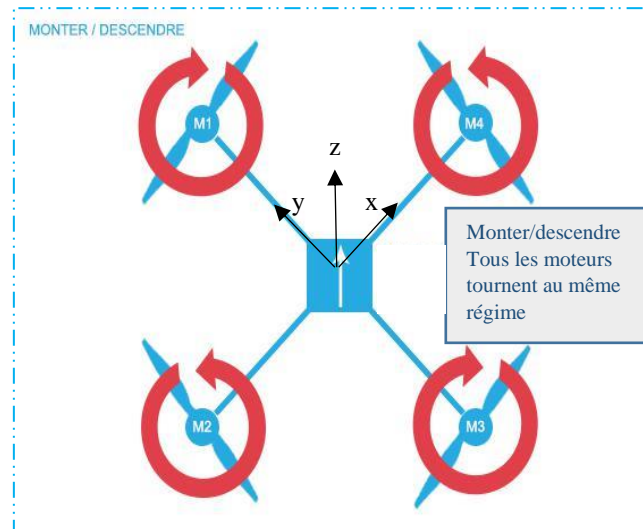


Figure II.5. Illustration du mouvement vertical.

II. 3.5. Mouvement horizontal

Le mouvement horizontal est un mouvement de translation sur l'axe (x) et (y). Pour réaliser cela, on applique une variation de vitesse entre deux rotors opposés et garder une vitesse moyenne pour les deux autres. Dans ce cas, la translation sera vers le sens du rotor qui porte la force de poussée la plus faible.

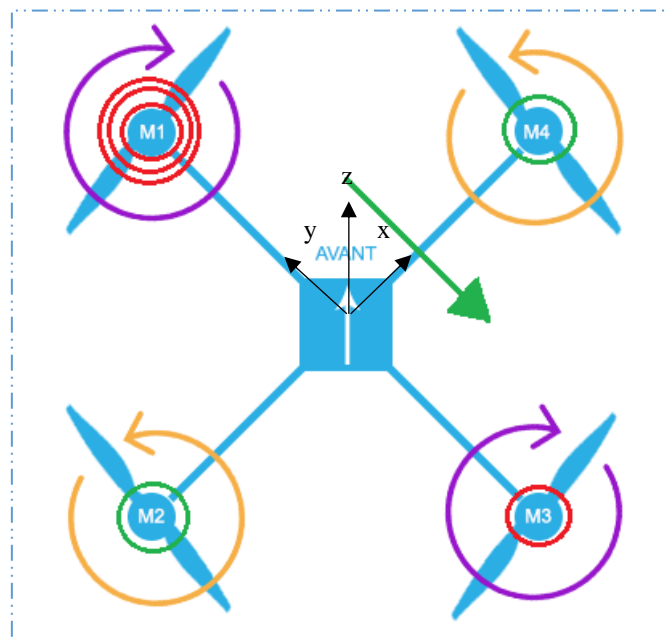


Figure II.6. Mouvement horizontal (translation)



II. 4. Dynamique du quadri-rotor

Beaucoup de modélisation du quadri-rotor sont énumérés par les chercheurs tels que celle établie par Lozano [9] en utilisant la méthode Euler-Lagrange. De même, le modèle présenté par Hamel [10] est basé sur le formalisme de Newton qui a été obtenu à partir de la dynamique d'un corps rigide associé au fuselage auquel sont ajoutées les forces aérodynamiques générées par les rotors, ce modèle en plus intègre la dynamique des actionneurs. Notre approche de modélisation est basée sur le formalisme de Newton.

La modélisation des quadri-rotor est une tâche délicate puisque la dynamique du système est fortement non linéaire et pleinement couplée. Afin de faciliter la modélisation du drone quadri-rotor, les chercheurs ont proposé les hypothèses suivantes :

- La structure du quadri-rotor est supposée rigide et symétrique, ce qui induit que la matrice d'inertie sera supposée diagonale.
- Les hélices sont supposées rigides pour pouvoir négliger l'effet de leur déformation lors de la rotation.
- Le centre de masse et l'origine du repère lié à la structure coïncident.
- Les forces de portance et de traînée sont proportionnelles aux carrés de la vitesse de rotation des rotors, ce qui est une approximation très proche du comportement aérodynamiques du système.

II. 4.1. Définition des repères

On cherche maintenant à déterminer les repères choisis pour étudier le mouvement du quadri-rotor (figure II.7). Un repère lié au quadri-rotor $R_b(x_b, y_b, z_b)$ selon la convention nord-ouest-haut respectivement. L'origine de ce repère est confondue avec le centre de gravité du quadri-rotor. Un second repère est lié à la terre $R_e(x_e, y_e, z_e)$ encore selon la convention nord-ouest-haut.

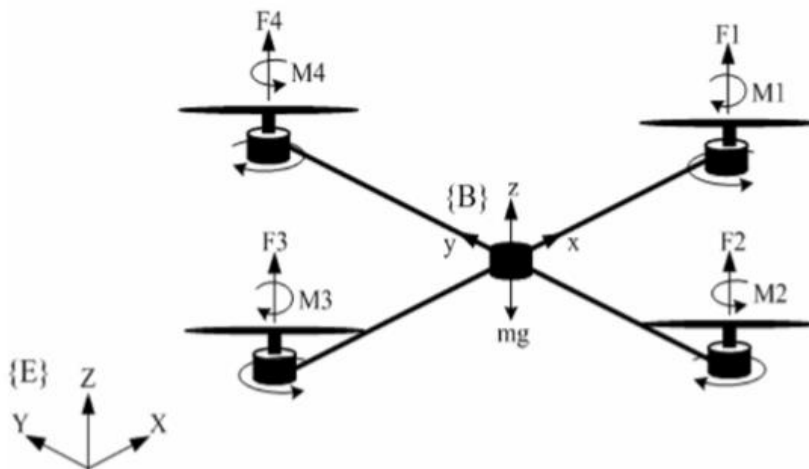


Figure II.7. Configuration du quadri-rotor.



II. 4.2. La matrice de rotation [11]

Le passage entre le repère mobile R_b et le repère fixe R_e est donné par une matrice dite matrice de passage H qui contient l'orientation et la position de repère mobile par rapport au repère fixe.

Au début, les deux repères fixe et mobile se coïncident. Ensuite, le repère mobile fait un mouvement de rotation autour de l'axe x d'un angle de roulis ($-\frac{\pi}{2} < \varphi < \frac{\pi}{2}$), suivi d'une rotation autour de l'axe y d'un angle de tangage ($-\frac{\pi}{2} < \theta < \frac{\pi}{2}$), et finalement d'une troisième rotation autour de l'axe z d'angle de lacet ($-\frac{\pi}{2} < \psi < \frac{\pi}{2}$). En utilisant les angles d'Euler, les matrices des rotations selon (x, y, z) sont :

- H_z , est la matrice de rotation d'angle ψ autour de Oz , appelée Lacet.

$$H(z, \psi) = \begin{pmatrix} \cos\psi & -\sin\psi & 0 \\ \sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{II.1})$$

- H_y , est la matrice de rotation d'angle θ autour de Oy , appelée Tangage.

$$H(y, \theta) = \begin{pmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta \end{pmatrix} \quad (\text{II.2})$$

- H_x , est la matrice de rotation d'angle φ autour de Ox , appelée Roulis.

$$H(x, \varphi) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\varphi & -\sin\varphi \\ 0 & \sin\varphi & \cos\varphi \end{pmatrix} \quad (\text{II.3})$$

Note : les écritures $\psi(t)$, $\theta(t)$, et $\varphi(t)$ seront notés ψ , θ , et φ , pour la simplification.

La matrice globale de rotation entre le repère R_e et R_b est :

$$H = H(\psi, \theta, \varphi) = H(z, \psi) * H(y, \theta) * H(x, \varphi). \quad (\text{II.4})$$

En effectuant le produit de ces trois matrices on obtient :

$$H(\psi, \theta, \varphi) = \begin{pmatrix} \cos\psi & -\sin\psi & 0 \\ \sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\varphi & -\sin\varphi \\ 0 & \sin\varphi & \cos\varphi \end{pmatrix} \quad (\text{II.5})$$

$$H(\psi, \theta, \varphi) = \begin{bmatrix} c\theta c\psi & c\psi s\theta s\varphi - s\psi c\varphi & c\psi s\theta s\varphi + s\psi s\varphi \\ c\theta s\psi & s\psi s\theta s\varphi + c\psi c\varphi & s\psi s\theta c\varphi - c\psi s\varphi \\ -s\theta & c\theta s\varphi & c\theta c\varphi \end{bmatrix} \quad (\text{II.6})$$

Avec $c = \cos$, et $s = \sin$.



II. 4.3. La vitesse angulaire

Les vitesses de rotations $\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3$ dans le repère fixe sont exprimées en fonction des vitesses de rotations $\dot{\varphi}, \dot{\theta}, \dot{\psi}$ dans le repère mobile, on a :

$$\Omega = \begin{pmatrix} \Omega_1 \\ \Omega_2 \\ \Omega_3 \end{pmatrix} = H^T(\varphi, \theta, \psi) \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\psi} \end{pmatrix} + H^T(\theta, \varphi) \begin{pmatrix} 0 \\ \dot{\theta} \\ 0 \end{pmatrix} + H^T(\varphi) \cdot \begin{pmatrix} \dot{\varphi} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (\text{II.7})$$

Cette égalité résulte de fait que la dernière rotation est celle de $\dot{\varphi}$, donc elle nécessite une seule matrice de rotation $H^T(\varphi)$, tandis que pour obtenir $\dot{\theta}$ puis $\dot{\psi}$ on a besoin de deux (respectivement de trois) rotations.

Après le calcul, on obtient :

$$\begin{pmatrix} \Omega_1 \\ \Omega_2 \\ \Omega_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -\sin\theta \\ 0 & \cos\varphi & \sin\varphi \cos\theta \\ 0 & -\sin\varphi & \cos\varphi \cos\theta \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \dot{\varphi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{pmatrix} \quad (\text{II.8})$$

A noter que $H^T(\varphi, \theta, \psi)$ est la matrice transposée de $H(\varphi, \theta, \psi)$, égale en même temps à la matrice inverse, du fait que la matrice de rotation est orthogonale c.à.d. $H^T \cdot H = I_{3,3}$ avec $I_{3,3}$ est la matrice identité. De même pour $H^T(\theta, \varphi)$ et $H^T(\varphi)$.

L'inverse nous donne :

$$\begin{pmatrix} \dot{\varphi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \tan\theta \sin\varphi & \tan\theta \cos\varphi \\ 0 & \cos\varphi & -\sin\varphi \\ 0 & \frac{\sin\varphi}{\cos\theta} & \frac{\cos\varphi}{\cos\theta} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \Omega_1 \\ \Omega_2 \\ \Omega_3 \end{pmatrix} \quad (\text{II.9})$$

Quand le quadri-rotor fait des petites rotations, on peut faire les approximations suivantes :

$$\cos(\varphi) = \cos(\theta) = \cos(\psi) = 1, \text{ et } \sin(\varphi) = \sin(\theta) = \sin(\psi) = 0.$$

Donc la vitesse angulaire sera :

$$\Omega = (\dot{\varphi} \quad \dot{\theta} \quad \dot{\psi})^T \quad (\text{II.10})$$

II. 4.4. La vitesse linéaire

Les vitesses linéaires V_x^e, V_y^e, V_z^e dans le repère fixe en fonction des vitesses linéaires V_x^b, V_y^b, V_z^b dans le repère mobile sont données par :

$$V = \begin{pmatrix} V_x^e \\ V_y^e \\ V_z^e \end{pmatrix} = H \times \begin{pmatrix} V_x^b \\ V_y^b \\ V_z^b \end{pmatrix} \quad (\text{II.11})$$



II. 4.5. Les effets Physiques agissants sur le quadri-rotor :

II.4.5.1. Les forces

Les forces agissant sur le système sont :

- **Le poids** : il est donné par

$$P = mg \quad (\text{II.12})$$

m : la masse du quadri-rotor.

g : la gravité.

→ **Les forces de portances** : sont des forces provoquées par la rotation des moteurs, elles sont perpendiculaires sur le plan des hélices. Elles représentent la force totale produite par les quatre hélices, elle est donnée par :

$$F_p = (\sum_{i=1}^4 f_i) \quad (\text{II.13})$$

Où : f_i est la force de portance produite par la rotation de l'hélice i , elle est donnée par :

$$f_i = b\omega_i^2 \quad (\text{II.14})$$

Avec :

b le coefficient de portance, il dépend de la forme et le nombre des pales et la densité de l'air.

Donc la force de portance totale est :

$$F_p = b (\omega_1^2 + \omega_2^2 + \omega_3^2 + \omega_4^2) \quad (\text{II.15})$$

- **Les forces de traînée** : C'est la résultante des forces qui s'opposent au mouvement du quadri-rotor dans l'air, de même direction que le mouvement du quadri-rotor mais de sens opposé. Elle représente en quelque sorte les forces de frottement visqueux sur quadri-rotor, elle est donnée

- » La traînée dans les hélices : elle agisse sur les pales, elle est proportionnelle à la masse volumique de l'air, à la forme des pales et au carré de la vitesse de rotation de l'hélice, elle est donnée par la relation suivante :

$$T_h = d\omega^2 \quad (\text{II.16})$$

Avec :

d est le coefficient de traînée il dépend de la fabrication de l'hélice.

- » La traînée selon les axes(x, y, z) : elle est due au mouvement du corps du quadri-rotor

$$F_t = K_{ft} V \quad (\text{II.17})$$

Avec :

K_{ft} est le coefficient de traînée de translation et V la vitesse linéaire.



II.4.5.2. Les moments

Il y a plusieurs moments agissants sur le quadri-rotor, ces moments sont dus aux forces de poussée et de traînée et aux effets gyroscopiques.

- Moments dus aux forces de poussée :

- » La rotation autour de l'axe x : elle est due au moment créé par la différence entre les forces de portance des rotors 2 et 4, ce moment est donné par la relation suivante :

$$M_x = l (F_4 - F_2) = lb (\omega_4^2 - \omega_2^2) \quad (\text{II.18})$$

Avec : l est la longueur du bras entre le rotor et le centre de gravité du quadri-rotor.

- » La rotation autour de l'axe y : elle est due au moment créé par différence entre les forces de portance des rotors 1 et 3, ce moment est donné par la relation suivante :

$$M_y = l (F_3 - F_1) = lb (\omega_3^2 - \omega_1^2) \quad (\text{II.19})$$

- Moments dus aux forces de traînée :

- » La rotation autour de l'axe z : elle est due à un couple réactif provoqué par les couples de traînée dans chaque hélice, ce moment est donné par la relation suivante :

$$M_z = d (\omega_1^2 - \omega_2^2 + \omega_3^2 - \omega_4^2) \quad (\text{II.20})$$

- » Moment résultant des frottements aérodynamiques, il est donné par :

$$M_a = K_{fa} \Omega^2 \quad (\text{II.21})$$

Avec :

K_{fa} le coefficient des frottements aérodynamiques et Ω est la vitesse angulaire.

II.4.5.3. Les effets gyroscopiques [11]

L'effet gyroscopique désigne un dispositif qui se compose principalement d'une roue opérant un mouvement rotatif sur un axe, qui aurait tendance à montrer une résistance aux changements de son mouvement. L'effet gyroscopique est ainsi nommé en référence au mode de fonctionnement du gyroscope, appareil de contrôle de mouvement utilisé dans l'aviation (du grec gyro qui signifie rotation et scope, observer).

Dans notre cas il existe deux moments gyroscopiques :

- Le moment gyroscopique des hélices : il est donné par l'expression suivante :

$$M_{gh} = \sum_{i=1}^4 \Omega \wedge Jr \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ (-1)^i \omega_i \end{pmatrix} \quad (\text{II.22})$$

Avec :

J_r est la matrice d'inertie de chaque rotor supposé diagonale :



$$J_r = \begin{pmatrix} Jrx & 0 & 0 \\ 0 & Jry & 0 \\ 0 & 0 & Jrz \end{pmatrix} \quad (\text{II.23})$$

On obtient :

$$M_{gh} = \sum_{i=1}^4 [(-1)^i \omega_i Jrz] \Omega \wedge z_b \quad (\text{II.24})$$

- Le moment gyroscopique dû aux mouvements de quadri-rotor : il est donné par la relation suivante :

$$M_{gm} = \Omega \wedge J \Omega \quad (\text{II.25})$$

Avec :

J est la matrice d'inertie du système diagonale (la structure du quadri-rotor est supposée symétrique) donnée par :

$$J = \begin{pmatrix} Ix & 0 & 0 \\ 0 & Iy & 0 \\ 0 & 0 & Iz \end{pmatrix} \quad (\text{II.26})$$

II. 4.6. Développement du Modèle mathématique selon Newton-Euler [11-12-13-14]

En utilisant la formulation de Newton-Euler, les équations dynamiques sont écrites sous la forme suivante:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{\zeta} = v \\ m\ddot{\zeta} = F_f + F_t + F_g \\ \dot{H} = H S(\Omega) \\ J\dot{\Omega} = -\Omega \wedge J\Omega + M_f - M_a - M_{gh} \end{array} \right. \quad (\text{II.27})$$

Avec :

ζ : est le vecteur de position du quadri-rotor.

m : La masse totale du quadri-rotor.

Ω : La vitesse angulaire exprimée dans le repère fixe.

H : La matrice de rotation.

\wedge : Le produit vectoriel.

J : matrice d'inertie de dimension 3x3.

$S(\Omega)$: est la matrice antisymétrique, pour un vecteur de vitesse $\Omega = (\Omega_1 \ \Omega_2 \ \Omega_3)^T$, elle est donnée par :

$$S(\Omega) = \begin{pmatrix} 0 & -\Omega_3 & \Omega_2 \\ \Omega_3 & 0 & -\Omega_1 \\ -\Omega_2 & \Omega_1 & 0 \end{pmatrix} \quad (\text{II.28})$$



La force totale générée par les quatre rotors, elle est donnée par :

$$F_f = H \times [0 \ 0 \ \sum_{i=1}^4 f_i]^T \quad (\text{II.29})$$

La force de trainée selon les axes (x, y, z), elle est donnée par :

$$F_t = \begin{pmatrix} -K_1 & 0 & 0 \\ 0 & -K_2 & 0 \\ 0 & 0 & -K_3 \end{pmatrix} \dot{\zeta} \quad (\text{II.30})$$

K_1, K_2, K_3 sont respectivement $K_{f_{tx}}, K_{f_{ty}}, K_{f_{tz}}$, les coefficients de trainée de translation.

F_g : est la force de gravité, elle est donnée par :

$$F_g = [0 \ 0 \ -mg]^T \quad (\text{II.31})$$

M_f : moment provoqué par les forces de poussée et de trainée.

$$M_f = \begin{pmatrix} l(F_4 - F_2) \\ l(F_3 - F_1) \\ d(\omega_1^2 - \omega_2^2 + \omega_3^2 - \omega_4^2) \end{pmatrix} \quad (\text{II.32})$$

M_a : moment résultant des frottements aérodynamiques, il est donnée par :

$$M_a = (K_{f_{ax}} \dot{\varphi}^2 \quad K_{f_{ay}} \dot{\theta}^2 \quad K_{f_{az}} \dot{\psi}^2)^T \quad (\text{II.33})$$

$K_{f_{ax}}, K_{f_{ay}}, K_{f_{az}}$: les coefficients des frottements aérodynamiques.

II.4.6.1. Equations de mouvement de translation

On a :

$$m \ddot{\zeta} = F_f + F_t + F_g \quad (\text{II.34})$$

On remplace chaque force par sa formule, on trouve :

$$m \begin{pmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c\varphi c\psi s\theta + s\varphi s\psi \\ c\varphi s\theta s\psi - s\varphi c\psi \\ c\varphi c\theta \end{pmatrix} \sum_{i=1}^4 f_i - \begin{pmatrix} K_1 \dot{x} \\ K_2 \dot{y} \\ K_3 \dot{z} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ mg \end{pmatrix} \quad (\text{II.35})$$

On obtient alors les équations différentielles qui définissent le mouvement de translation :

$$\left\{ \begin{array}{l} \ddot{x} = \frac{1}{m} (\cos\varphi \cos\psi \sin\theta + \sin\varphi \sin\psi) \left(\sum_{i=1}^4 f_i \right) - \left(\frac{K_1}{m} \dot{x} \right) \\ \ddot{y} = \frac{1}{m} (\cos\varphi \cos\psi \sin\psi + \sin\varphi \cos\psi) \left(\sum_{i=1}^4 f_i \right) - \left(\frac{K_2}{m} \dot{y} \right) \\ \ddot{z} = \frac{1}{m} (\cos\varphi \cos\theta) \left(\sum_{i=1}^4 f_i \right) - \left(\frac{K_3}{m} \dot{z} \right) - g \end{array} \right. \quad (\text{II.36})$$



II.4.6.2. Equations de mouvement de rotation

La loi de Newton en rotation s'écrit :

$$J\dot{\Omega} = -M_{gm} - M_{gh} - M_a + M_f \quad (\text{II.37})$$

On remplace chaque moment par la formule correspondant, on trouve :

$$\begin{pmatrix} I_x & 0 & 0 \\ 0 & I_y & 0 \\ 0 & 0 & I_z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{\phi} \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{\psi} \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{pmatrix} \wedge \left[\begin{pmatrix} I_x & 0 & 0 \\ 0 & I_y & 0 \\ 0 & 0 & I_z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{pmatrix} \right] - \begin{pmatrix} J_r \overline{\Omega}_r \dot{\theta} \\ -J_r \overline{\Omega}_r \dot{\phi} \\ 0 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} K_{fax} \dot{\phi}^2 \\ K_{fay} \dot{\theta}^2 \\ K_{faz} \dot{\psi}^2 \end{pmatrix} \\ + \begin{pmatrix} lb(\omega_4^2 - \omega_2^2) \\ lb(\omega_3^2 - \omega_1^2) \\ d(\omega_1^2 - \omega_2^2 + \omega_3^2 - \omega_4^2) \end{pmatrix} \quad (\text{II.38})$$

Par conséquent, les équations différentielles définissant le mouvement de rotation sont:

$$\begin{cases} I_x \ddot{\phi} &= -\dot{\theta} \dot{\psi} (I_z - I_y) - J_r \overline{\Omega}_r \dot{\theta} - K_{fax} \dot{\phi}^2 + lb(\omega_4^2 - \omega_2^2) \\ I_y \ddot{\theta} &= \dot{\phi} \dot{\psi} (I_z - I_x) + J_r \overline{\Omega}_r \dot{\phi} - K_{fay} \dot{\theta}^2 + lb(\omega_3^2 - \omega_1^2) \\ I_z \ddot{\psi} &= -\dot{\phi} \dot{\theta} (I_y - I_x) - K_{faz} \dot{\psi}^2 + d(\omega_1^2 - \omega_2^2 + \omega_3^2 - \omega_4^2) \end{cases} \quad (\text{II.39})$$

Avec :

$$\overline{\Omega}_r = \omega_1 - \omega_2 + \omega_3 - \omega_4 \quad (\text{II.40})$$

Finalement, le modèle dynamique complet qui régit le quadri-rotor est le suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} \ddot{\phi} = \frac{(I_y - I_z)}{I_x} \dot{\theta} \dot{\psi} - \frac{J_r}{I_x} \overline{\Omega}_r \dot{\theta} - \frac{K_{fax}}{I_x} \dot{\phi}^2 + \frac{1}{I_x} u_2 \\ \ddot{\theta} = \frac{(I_z - I_x)}{I_y} \dot{\phi} \dot{\psi} + \frac{J_r}{I_y} \overline{\Omega}_r \dot{\phi} - \frac{K_{fay}}{I_y} \dot{\theta}^2 + \frac{1}{I_y} u_3 \\ \ddot{\psi} = \frac{(I_x - I_y)}{I_z} \dot{\theta} \dot{\phi} - \frac{K_{faz}}{I_z} \dot{\psi}^2 + \frac{1}{I_z} u_4 \\ \ddot{x} = -\frac{K_{ftx}}{m} \dot{x} + \frac{1}{m} u_x u_1 \\ \ddot{y} = -\frac{K_{fty}}{m} \dot{y} + \frac{1}{m} u_y u_1 \\ \ddot{z} = -\frac{K_{ftz}}{m} \dot{z} - g + \frac{\cos(\phi)\cos\theta}{m} u_1 \end{array} \right. \quad (\text{II.41})$$



Avec :

$$\begin{cases} u_x = (c\varphi c\psi s\theta + s\varphi s\psi) \\ u_y = (c\varphi s\theta s\psi - s\varphi c\psi) \end{cases} \quad (\text{II.42})$$

L'écriture des entrées de commande en fonction des vitesses des rotors est :

$$\begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b & b & b & b \\ 0 & -lb & 0 & lb \\ -lb & 0 & lb & 0 \\ d & -d & d & -d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \omega_1^2 \\ \omega_2^2 \\ \omega_3^2 \\ \omega_4^2 \end{pmatrix} \quad (\text{II.43})$$

A partir de (II.42), on trouve :

$$\begin{cases} \varphi_d = \arcsin(u_x \sin(\psi_d) - u_y \cos(\psi_d)) \\ \theta_d = \arcsin\left(\frac{u_x \cos(\psi_d) - u_y \sin(\psi_d)}{\cos(\varphi_d)}\right) \end{cases} \quad (\text{II.44})$$

II.4.7. La représentation d'état du système

Pour mettre le système sous forme d'état, on choisit le vecteur d'état comme suit [4][5][6][7]

$$\begin{aligned} X &= [\varphi \quad \dot{\varphi} \quad \theta \quad \dot{\theta} \quad \psi \quad \dot{\psi} \quad x \quad \dot{x} \quad y \quad \dot{y} \quad z \quad \dot{z}]^T \\ X &= [x_1 \quad x_2 \quad x_3 \quad x_4 \quad x_5 \quad x_6 \quad x_7 \quad x_8 \quad x_9 \quad x_{10} \quad x_{11} \quad x_{12}]^T \end{aligned} \quad (\text{II.45})$$

La représentation d'état obtenue est :

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = a_1 x_4 x_6 + a_2 x_2^2 + a_3 \bar{\Omega}_r x_4 + b_1 u_2 \\ \dot{x}_3 = x_4 \\ \dot{x}_4 = a_4 x_2 x_6 + a_5 x_4^2 + a_6 \bar{\Omega}_r x_2 + b_2 u_3 \\ \dot{x}_5 = x_6 \\ \dot{x}_6 = a_7 x_2 x_4 + a_8 x_6^2 + b_3 u_4 \\ \dot{x}_7 = x_8 \\ \dot{x}_8 = a_9 x_8 + \frac{1}{m} u_x u_1 \\ \dot{x}_9 = x_{10} \\ \dot{x}_{10} = a_{10} x_{10} + \frac{1}{m} u_y u_1 \\ \dot{x}_{11} = x_{12} \\ \dot{x}_{12} = a_{11} x_{12} + \frac{\cos(\varphi) \cos(\theta)}{m} u_1 - g \end{array} \right. \quad (\text{II.46})$$



Avec :

$$\left\{ \begin{array}{l} a_1 = \frac{I_y - I_z}{I_x}, a_2 = -\frac{K_{f_{ax}}}{I_x}, a_3 = -\frac{J_r}{I_x}, a_4 = \frac{I_z - I_x}{I_y}, a_5 = -\frac{K_{f_{ay}}}{I_y}, \\ a_6 = \frac{J_r}{I_y}, a_7 = \frac{I_x - I_y}{I_z}, a_8 = -\frac{K_{f_{az}}}{I_z}, a_9 = -\frac{K_{f_{tx}}}{m}, a_{10} = -\frac{K_{f_{ty}}}{m}, \\ a_{11} = -\frac{K_{f_{tz}}}{m}, b_1 = \frac{1}{I_x}, b_2 = \frac{1}{I_y}, b_3 = \frac{1}{I_z} \end{array} \right. \quad (\text{II.47})$$

II.4.8. La dynamique des rotors [15]

Les moteurs couramment utilisés dans les quadri-rotors sont des moteurs à courant continu (CC) sans balais qui fournissent un couple élevé et peu de frottement. Il est supposé que les rotors sont sans noyau avec un couplage mécanique rigide entre les moteurs et les hélices. La dynamique du rotor est approximée à celle d'un moteur à courant continu, elle est donnée par les équations différentielles suivantes :

$$J_r \dot{\omega}_i = \tau_i - Q_i, \quad i = 1, \dots, 4. \quad (\text{II.48})$$

Avec :

τ_i est le couple fournit par le moteur en (Nm).

$Q_i = d\omega_i^2$ est le couple résistant généré par le rotor i . en (N.m).

$\dot{\omega}_i$ est l'accélération angulaire du moteur en (rad.s⁻²).

J_r est le moment d'inertie total du moteur en (N.m.s²).

Le schéma d'un moteur à CC sans balais à l'état d'équilibre est illustré par la figure II.7.

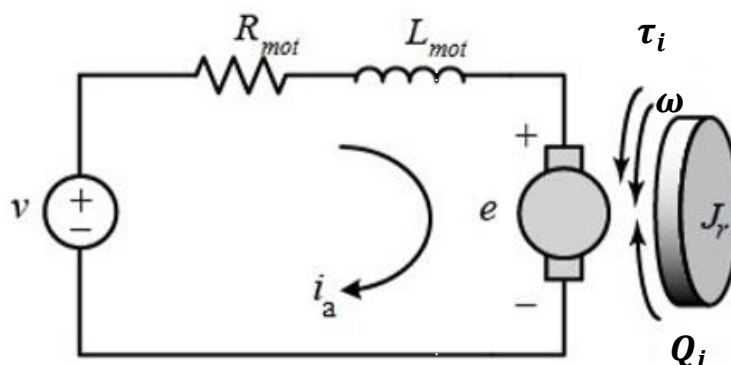


Figure.II.8.Schéma d'un moteur à CC

On applique la loi de Kirchhoff :



$$V = R_{mot} i_a + L_{mot} \frac{di_a}{dt} + K_{mot} \omega \quad (II.49)$$

Avec :

V est le voltage produit par la batterie.

i_a est le courant produit par la batterie en (A).

K_{mot} est la constante du moteur en (v.s.rad⁻¹).

ω est la vitesse angulaire du moteur en (rad.s⁻¹).

R_{mot} , L_{mot} sont respectivement la i ème résistance et l'inductance du moteur.

La plupart des moteurs utilisés en robotique ont une inductance faible grâce à l'optimisation de la construction. Pour cette raison, l'équation (II.49) sera approximée par:

$$V = R_{mot} i_a + K_{mot} \omega \quad (II.50)$$

En déduit le courant produit par la batterie :

$$i_a = \frac{V - K_{mot} \omega}{R_{mot}} \quad (II.51)$$

Le couple produit par le moteur est:

$$\tau_i = K_e i_a \quad (II.52)$$

Où :

K_e est la constante électrique du moteur et pour les petits moteurs, il est approximativement égal à K_{mot} .

Q_i est le couple de charge qui est le couple généré par le système d'hélice qui est :

$$Q_i = d \omega_i^2 \quad (II.53)$$

La substitution des équations de τ_i et Q_i donne :

$$J_r \dot{\omega}_i = K_{mot} \frac{V - K_{mot} \omega_i}{R_{mot}} - d \omega_i^2 \quad (II.54)$$

Après simplification, la tension peut être écrite en fonction de la vitesse du rotor comme suit :

$$V = \frac{R_{mot}}{K_{mot}} J_r \dot{\omega}_i + K_{mot} \omega_i + d R_{mot} \omega_i^2 \quad (II.55)$$



II.4.9. Conclusion

Ce chapitre décrit les généralités du quadri-rotor et explique le principe de fonctionnement du quadri-rotor. Une description détaillée de ses mouvements est énumérés par des figures à la base des forces et des moments (tangage, roulis, lacet) agissants pour obtenir le vol désiré.

Il présente une modélisation du quadri-rotor qui a été établi par l'usage du formalisme Newton-Euler, ce dernier a permet d'aboutir au modèle dynamique du quadri-rotor.

En conséquence, le quadri-rotor est un système sous actionné.



III. 1. Introduction

Différentes stratégies de contrôle appliquées sur le modèle d'un quadri-rotor, sont rencontrées dans les différents projets.

Le système de commande est un algorithme mathématique qui calcule de quelle façon il faut agir sur le quadri-rotor afin de maintenir la mesure égale à la consigne. Malgré son principe général relativement simple, la conception d'un tel système nécessite une attention particulière, compte tenu de la dynamique complexe et sous actionnée du quadri-rotor.

Les contrôleurs linéaires sont appliqués à un modèle linéarisé du quadri-rotor, la linéarisation se fait autour d'un point fonctionnement en utilisant la méthode de la jacobéenne, parmi les commandes employées on cite : La commande classique Proportionnel Intégrateur Dérivateur (PID) qui a été testée avec succès sur plusieurs plateformes expérimentales, il est capable de maintenir l'équilibre et la stabilité de quadri-rotor à condition de vol stationnaire sans charge et avec charge. Un terme dérivé, ajouté à cette commande, conduit à une stabilité exponentielle et offre une performance en terme de rejet de perturbation. Une commande linéaire quadratique (LQR) assure le suivi de trajectoire désiré du système avec le minimum de consommation de l'énergie et fonctionne bien dans des conditions bruyantes mais son temps de réponse est assez lent, alors que la commande H_∞ présente un temps de réponse des angles de roulis et de lacet rapide, mais avec des petits dépassements. Toute fois ces commandes sont faciles à appliquer, car elles possèdent une simple architecture, mais leur performance n'est garantie que sur un point de fonctionnement particulier. Des algorithmes de contrôle spécifiques doivent être développés pour élargir le domaine d'opérationnalité des drones.

Les contrôleurs non linéaires sont plus performants, car ils sont appliqués à un modèle du quadri-rotor qui présente toutes les non linéarités importantes de la dynamique. Les commandes les plus utilisées sont maintenant présentées : La linéarisation entrée sortie, la commande par mode glissant, backstepping et la commande hiérarchique.

Dans ce chapitre, on va appliquer le correcteur PID puis on va faire la simulation en boucle ouverte et en boucle fermée.

III. 2. La commande PID

Le régulateur PID, appelé aussi correcteur PID (proportionnel, intégral, dérivé) est un système de contrôle permettant d'améliorer les performances d'un asservissement, c'est-à-dire un système ou procédé en boucle fermée. C'est le régulateur le plus utilisé dans l'industrie où ses qualités de correction s'appliquent à de multiples grandeurs physiques.

L'idée de cet organe de contrôle est de modifier intentionnellement la valeur de l'erreur qui subsiste entre la consigne et la mesure effectuée.

Un correcteur est un algorithme de calcul qui délivre un signal de commande à partir de la différence entre la consigne et la mesure.

Le correcteur PID agit de trois manières :

- action proportionnelle : l'erreur est multipliée par un gain K_p .
- action intégrale : l'erreur est intégrée et divisée par un gain K_i .
- action dérivée : l'erreur est dérivée et multipliée par un gain K_d .



La consigne : c'est la valeur que doit prendre la grandeur réglée.

III.2.1. Proportionnel 'P'

Dans le cas d'un contrôle proportionnel, l'erreur est virtuellement amplifiée d'un certain gain constant qu'il conviendra de déterminer en fonction du système.

$$\text{Consigne}(t) = Kp \varepsilon(t) \tag{III.1}$$

Ce qui en Laplace donne :

$$\text{Con}(p) = Kp\varepsilon(p) \tag{III.2}$$

L'idée étant d'augmenter l'effet de l'erreur sur le système afin que celui-ci réagisse plus rapidement aux changements de consignes. Plus la valeur de **Kp** est grande, plus la réponse ne l'est aussi. En revanche, la stabilité du système s'en trouve détériorée et dans le cas d'un **Kp** démesuré le système peut même diverger.

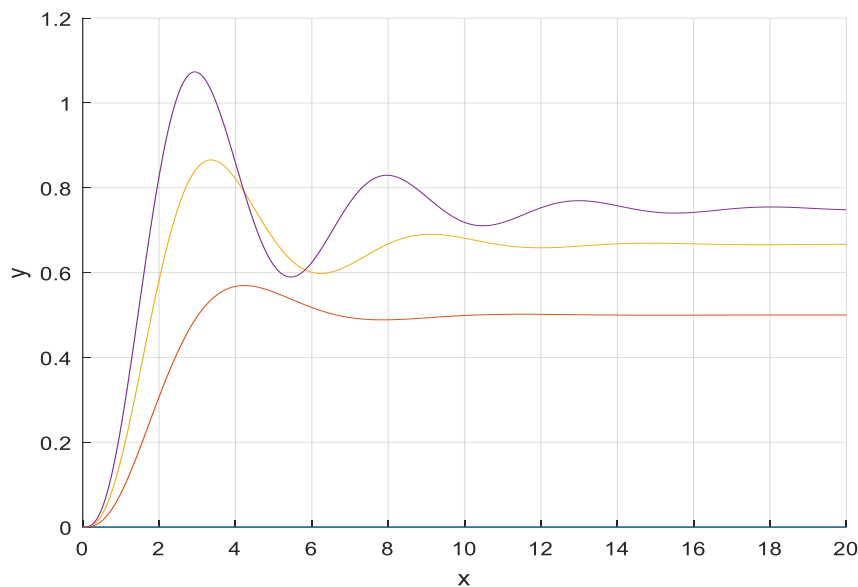


Figure.III.1. Illustration de l'action proportionnelle sous Matlab, la réponse à l'échelon.

III.2.2. Intégré 'I'

L'action intégrale complète l'action proportionnelle. Elle permet d'éliminer l'erreur résiduelle en régime permanent. Afin de rendre le système plus dynamique (diminuer le temps de réponse), on diminue l'action intégrale mais, ceci provoque l'augmentation du déphasage ce qui provoque l'instabilité en état fermé.

L'action intégrale est utilisée lorsqu'on désire avoir en régime permanent, une précision parfaite, en outre, elle permet de filtrer la variable à régler d'où l'utilité pour le réglage des variables bruitées telles que la pression

L'erreur entre la consigne et la mesure est ici intégrée par rapport au temps et multipliée par une constante qu'il faudra aussi déterminer en fonction du système.



$$y(t) = Kp(t) + Ki \int_0^t \varepsilon(\tau) d\tau \tag{III.3}$$

Ce qui en La place donne :

$$Y(p) = Kp(t) + Ki(p)/p \tag{III.4}$$

Plus **Ki** est élevé, plus l'erreur statique est corrigée.

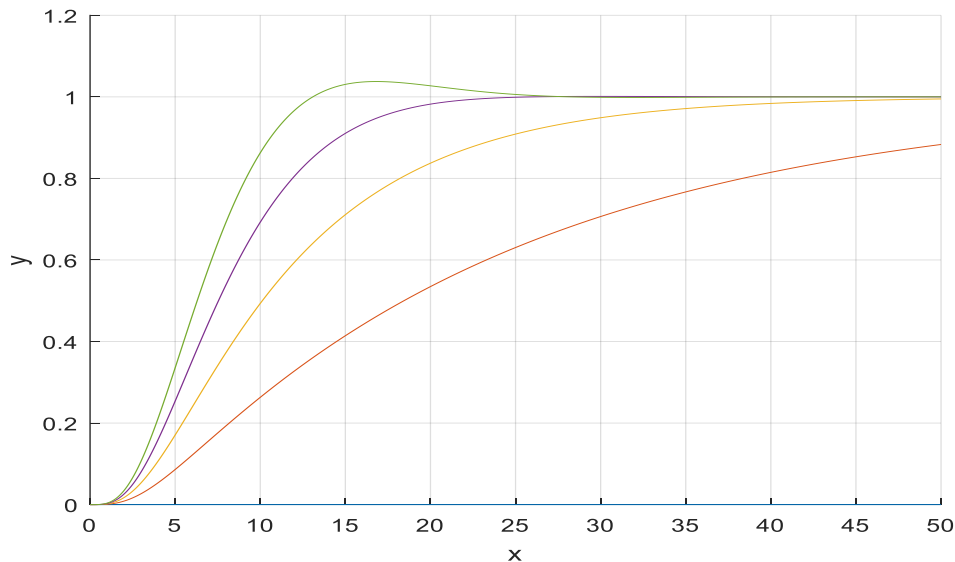


Figure.III.2. Illustration de l’action proportionnelle intégrale sous Matlab, la réponse à l’échelon.

III.2.3. Dérivé ‘D’

L'action Dérivée, en compensant les inerties dues au temps mort, accélère la réponse du système et améliore la stabilité de la boucle, en permettant notamment un amortissement rapide des oscillations dues à l'apparition d'une perturbation ou à une variation subite de la consigne.

Dans la pratique, l'action dérivée est appliquée aux variations de la grandeur à régler seule et non de l'écart mesure-consigne afin d'éviter les à-coups dus à une variation subite de la consigne.

L'action D est utilisée dans l'industrie pour le réglage des variables lentes telles que la température, elle n'est pas recommandée pour le réglage d'une variable bruitée ou trop dynamique (la pression). En dérivant un bruit, son amplitude risque de devenir plus importante que celle du signal utile.

Pour obtenir un contrôle en PID, il faut encore ajouter un terme. Celui-ci consiste à dériver l'erreur entre la consigne et la mesure par rapport au temps et a le multiplier lui aussi par une constante.

$$y(t) = Kp(t) + Ki \int_0^t \varepsilon(\tau) d\tau + Kd \frac{d}{dt} \varepsilon(t) \tag{III.5}$$

Ce qui en Laplace donne :



$$(p) = (p)[Kp + Ki(1/p) + Kd p] \tag{III.6}$$

Le contrôle PI peut amener à un dépassement de la consigne, ce qui n'est pas toujours très souhaitable (exemple d'inversion de polarité dans le cas de moteurs électriques). Le terme dérivé permet de limiter cela. Lorsque le système s'approche de la consigne, ce terme freine le système en appliquant une action dans le sens opposé et permet ainsi une stabilisation plus rapide.

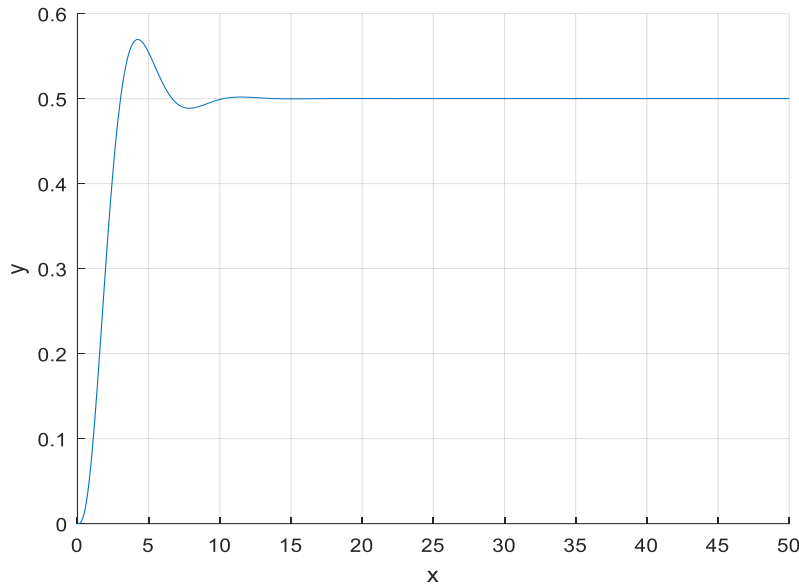


Figure.III.3. Illustration de l'action proportionnelle intégrale dérivée sous Matlab, la réponse à l'échelon.

Il existe plusieurs architectures possibles pour combiner les trois effets (série, parallèle ou mixte), on présente ici la plus classique, une structure PID parallèle qui agit sur l'Erreur.

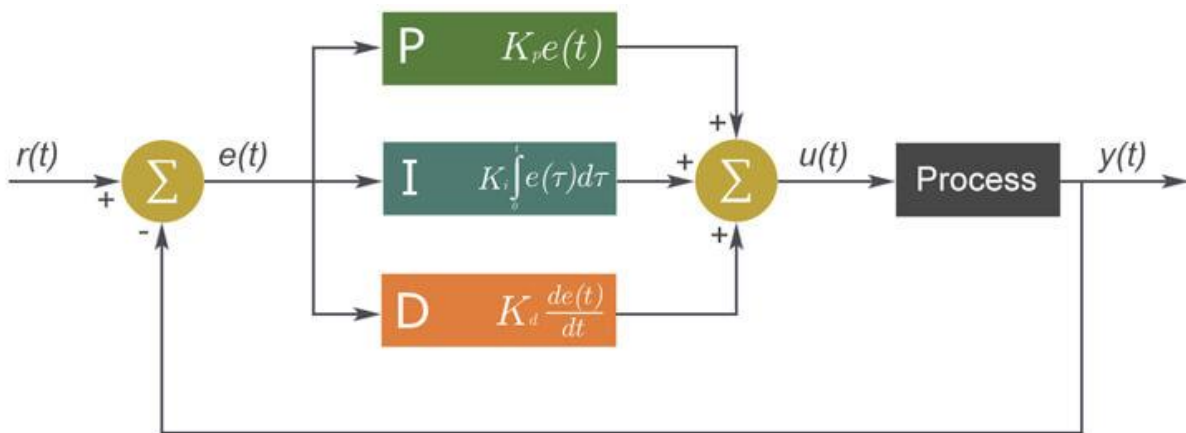


Figure.III.4. Schéma de bloc du régulateur PID



III.2.4. Le model ‘state space’

De nos jours, il est bien connu que l'un des principaux avantages de la méthode de ‘state space’ est la modélisation d'un système de contrôle à entrées multiples et à sorties multiples. Lorsque les équations d'un système sous contrôle sont fortement non linéaires, il est nécessaire d'appliquer une linéarisation. Le modèle ‘state space’ est un modèle mathématique d'un système sous forme d'un ensemble de variables d'entrée, de sortie et d'état associées à l'équation du premier ordre. Le modèle ‘state space’ s'exprime comme suit:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax(t) + Bu(t) \\ y &= Cx(t) + Du(t) \end{aligned} \tag{III.7}$$

Ou

- $x(t)$ le vecteur d'état.
- $u(t)$ vecteur de commande ou d'entrée.
- $y(t)$ vecteur de sortie.
- A la matrice d'état.
- B la matrice de commande.
- C la matrice d'observation.
- D la matrice d'action directe

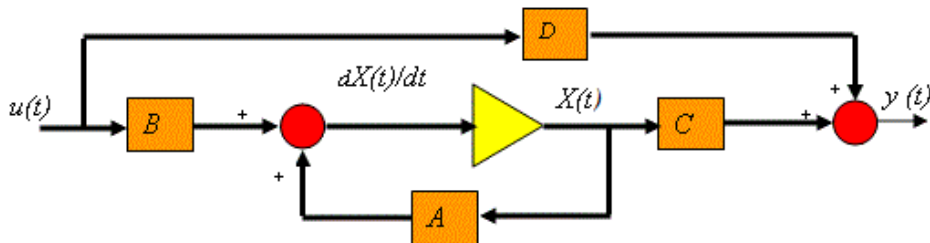


Figure.III.5. Représentation d'état matricielle

Le modèle obtenu dans le chapitre précédent, décrit les équations de notre système. Pour l'étude de contrôle, ou de l'asservissement, puisque notre système est non linéaire, les équations du model dynamique se sont écrit sous forme d'équation d'état $\dot{X} = f(X, U)$.

Un système non linéaire est un système qui n'est pas linéaire, c'est-à-dire qui ne peut pas être décrit par des équations différentielles linéaires à coefficients constants. Cette définition explique la complexité et la diversité des systèmes non linéaires et des méthodes qui s'y appliquent. Il n'y a pas une théorie générale pour ces systèmes, mais plusieurs méthodes adaptées à certaines classes de systèmes non linéaires.

A la différence des systèmes linéaires qui possèdent un point d'équilibre unique, les systèmes non linéaires peuvent posséder plusieurs points d'équilibre.



Mon système physique est représenté par un ensemble d'équations différentielles simultanées de la forme :

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_1 &= f_1(\dot{x}_1, \dot{x}_2, \dot{x}_3 \dots \dot{x}_{12}) \\
 \dot{x}_2 &= f_2(\dot{x}_1, \dot{x}_2, \dot{x}_3 \dots \dot{x}_{12}) \\
 \dot{x}_3 &= f_3(\dot{x}_1, \dot{x}_2, \dot{x}_3 \dots \dot{x}_{12}) \\
 &\vdots \\
 \dot{x}_{12} &= f_{12}(\dot{x}_1, \dot{x}_2, \dot{x}_3 \dots \dot{x}_{12})
 \end{aligned}
 \tag{III.8}$$

Le temps t étant la variable indépendante, x_1, x_2, \dots, x_{12} , les variables dépendantes et f_1, f_2, \dots, f_{12} , des fonctions, en général non linéaires des variables dépendantes (appelées vecteur de champ). Le point d'équilibre ou singulier se traduit par l'annulation de toutes les dérivées. Un système linéaire pour lequel le déterminant A est non nul conduit à un seul point d'équilibre, caractérisé par l'annulation de toutes les variables dépendantes.

Si les équations non linéaires données dans l'équation (II.46) sont linéarisées, les équations suivantes sont obtenues:

$$\left\{ \begin{aligned}
 \dot{x}_1 &= x_2 \\
 \dot{x}_2 &= b_1 u_2 \\
 \dot{x}_3 &= x_4 \\
 \dot{x}_4 &= b_2 u_3 \\
 \dot{x}_5 &= x_6 \\
 \dot{x}_6 &= b_3 u_4 \\
 \dot{x}_7 &= x_8 \\
 \dot{x}_8 &= -g x_3 \\
 \dot{x}_9 &= x_{10} \\
 \dot{x}_{10} &= g x_2 \\
 \dot{x}_{11} &= x_{12} \\
 \dot{x}_{12} &= \frac{1}{m} u_1
 \end{aligned} \right.
 \tag{III.9}$$

En analyse vectorielle, la matrice jacobienne est la matrice des dérivées partielles du premier ordre d'une fonction vectorielle en un point donné. Son nom vient du mathématicien Charles Jacobi. Le déterminant de cette matrice, appelé jacobien, joue un rôle important pour l'intégration par changement de variable et dans la résolution de problèmes non linéaires.

On suppose que le système possède un point singulier (x, u) , après la linéarisation l'équation (III.9) divisée en deux parties, la première partie représente le vol longitudinal $x_7, x_{11}, x_8, x_{12}, x_4, x_3$, et la deuxième partie représente le vol latéral $x_9, x_{10}, x_2, x_6, x_1, x_5$.

State space de mode longitudinal est :



$$\begin{bmatrix} \dot{x}_7 \\ \dot{x}_{11} \\ \dot{x}_8 \\ \dot{x}_{12} \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -g \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_7 \\ x_{11} \\ x_8 \\ x_{12} \\ x_4 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1/m & 0 \\ 0 & 1/I_y \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_3 \end{bmatrix} \quad (\text{III.10})$$

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_7 \\ x_{11} \\ x_8 \\ x_{12} \\ x_4 \\ x_3 \end{bmatrix} \quad (\text{III.11})$$

State space de mode latéral est :

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_9 \\ \dot{x}_{10} \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_6 \\ \dot{x}_1 \\ \dot{x}_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & g & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_9 \\ x_{10} \\ x_2 \\ x_6 \\ x_1 \\ x_5 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1/I_x & 0 \\ 0 & 1/I_y \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_2 \\ U_4 \end{bmatrix} \quad (\text{III.12})$$

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_9 \\ x_{10} \\ x_2 \\ x_6 \\ x_1 \\ x_5 \end{bmatrix} \quad (\text{III.13})$$

III.3. La simulation en boucle ouverte

On prend les conditions initiales, dans ce cas, c'est l'état du repos :

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{x}_1 = 0 \\ \dot{x}_2 = 0 \\ \dot{x}_3 = 0 \\ \dot{x}_4 = 0 \\ \dot{x}_5 = 0 \\ \dot{x}_6 = 0 \\ \dot{x}_7 = 0 \\ \dot{x}_8 = 0 \\ \dot{x}_9 = 0 \\ \dot{x}_{10} = 0 \\ \dot{x}_{11} = 0 \\ \dot{x}_{12} = 0 \end{array} \right. \quad (\text{III.14})$$

Les paramètres du quadri-rotor obtenus à partir du modèle dessiné sont donnés dans le tableau ci-dessous :



| Symbole | Désignation | valeur |
|----------------------|--|--------------------------|
| g | L'accélération gravitationnelle en m ² /s | 9.8 |
| M | La masse en Kg | 0.306 |
| I_x | Le moment d'inertie selon l'axe x en Kg * m ² | 3.8278 * 10 ³ |
| I_y | Le moment d'inertie selon l'axe y Kg * m ² | 3.8288 * 10 ³ |
| I_z | Le moment d'inertie selon l'axe z Kg * m ² | 7.6566 * 10 ³ |

Tableau III.1. Les paramètres du quadri-rotor.

On obtient les résultats de la matrices A et B :

➤ Mode longitudinale

$$\text{Along} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -9.8 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}; \quad \text{Blong} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 2.0576 & 0 \\ 0 & 261.1784 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

➤ Mode latérale

$$\text{Alat} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 9.8 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad \text{Blat} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 261.2467 & 0 \\ 0 & 130.6063 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

On obtient les fonctions de transferts suivantes ;

| Longitudinale | Latérale |
|---------------------|---------------------|
| $\frac{-2560}{s^4}$ | $\frac{2560}{s^4}$ |
| $\frac{2.058}{s^2}$ | $\frac{2560}{s^3}$ |
| $\frac{-2560}{s^3}$ | $\frac{261.2}{s}$ |
| $\frac{2.058}{s}$ | $\frac{130.2}{s}$ |
| $\frac{261.2}{s}$ | $\frac{261.2}{s^2}$ |



| | |
|---------------------|---------------------|
| $\frac{261.2}{s^2}$ | $\frac{130.6}{s^2}$ |
|---------------------|---------------------|

Tableau III.2. Les fonctions de transferts.

Un système en boucle ouverte ou contrôle ouvert est une forme de contrôle d'un système qui ne prend pas en compte la réponse de ce système.

La figure illustre la fonction de transfert d'un système en boucle ouverte :

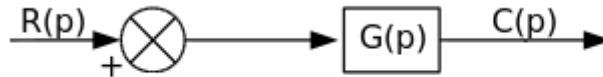


Figure.III.6. Schéma bloc d'un system en boucle ouverte.

III.4. La simulation en boucle fermée

Un contrôle en boucle fermée est une forme de contrôle d'un système qui intègre la réaction de ce système appelée anglais (feedback).

La figure illustre la fonction de transfert d'un système en boucle fermée :

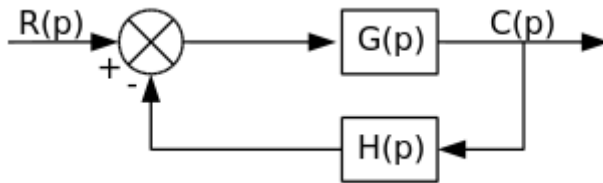


Figure.III.7. Schéma bloc d'un system en boucle fermée.

On prend les conditions initiales nulles et les paramètres de quadri-rotor du tableau (III.2).

Les figures suivantes représentent le mode longitude

Le premier test :

1)

Les pôles utilisés $K_p=1$; $K_i=0$; $K_d=0.19$.

Le graphe :

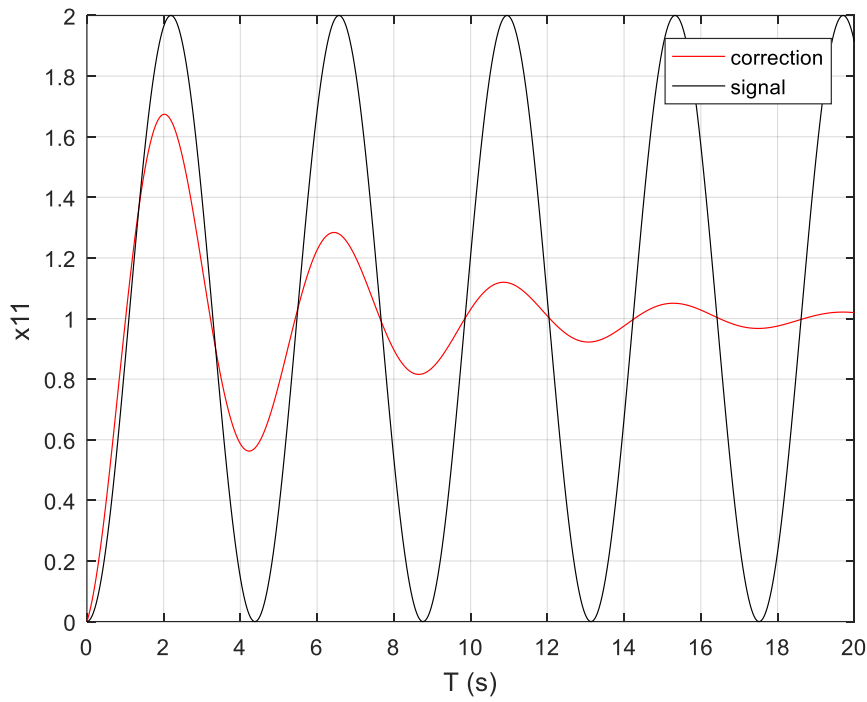


Figure.III.8. La réponse de la sortie x11

2)

Les pôles utilisés $K_p=1$; $K_i=6$; $K_d=0$.

Le graphe :

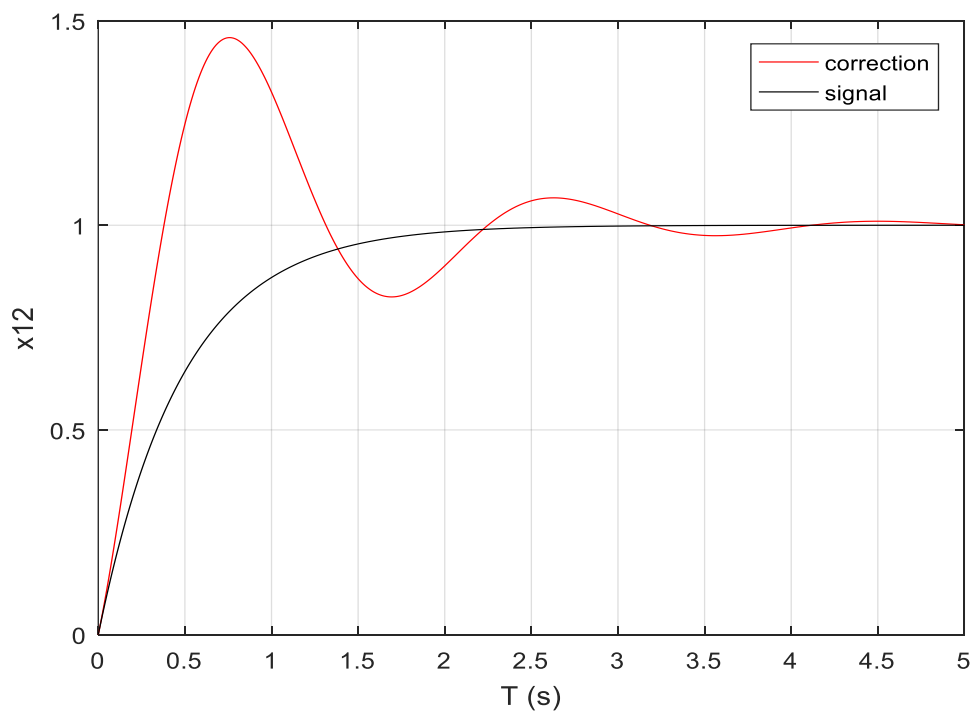


Figure.III.9. La réponse de la sortie x12



3)

Les pôles utilisés $K_p=0.9$; $K_i=4$; $K_d=9 \cdot 10^{-5}$.

Le graphe :

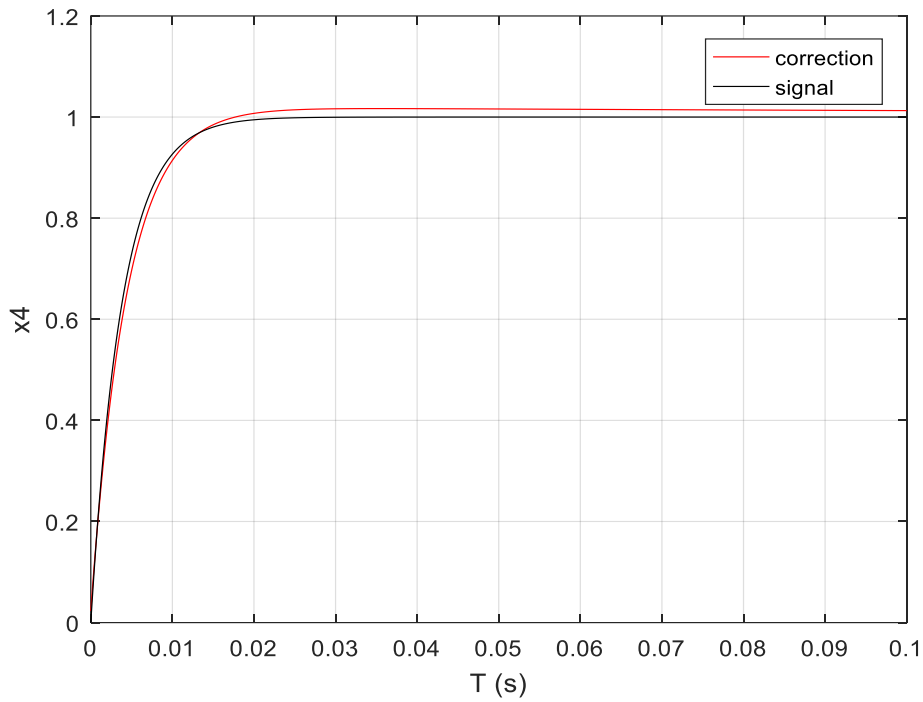


Figure.III.10. La réponse de la sortie x4

4)

Les pôles utilisés $K_p=5$; $K_i=0$; $K_d=0.05$.

Le graphe :

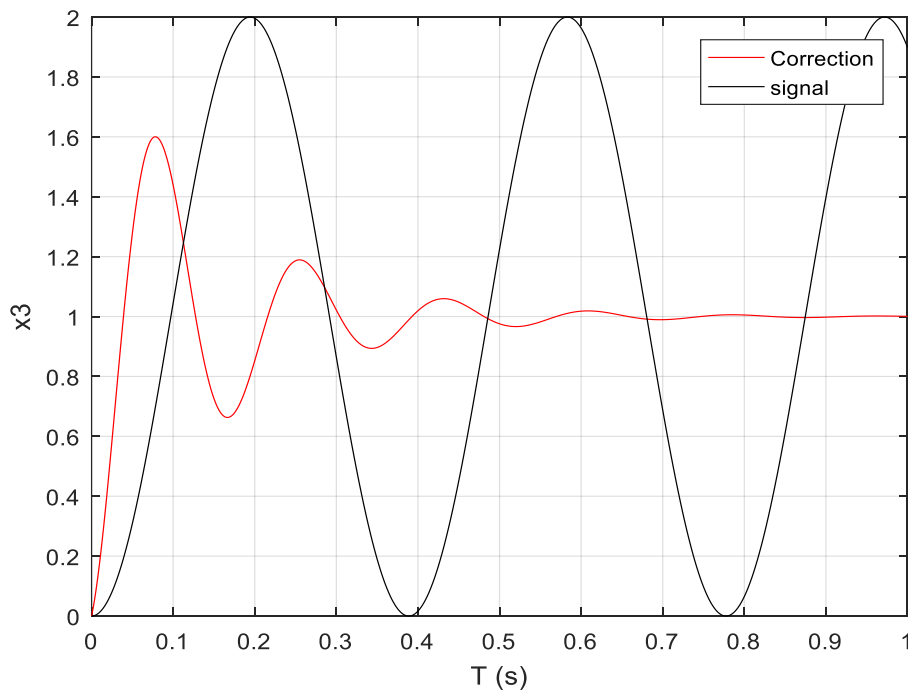


Figure.III.11. La réponse de la sortie x3



Le deuxième test :

1)

Les pôles utilisés $K_p=15$; $K_i=0$; $K_d=8$.

Le graphe :

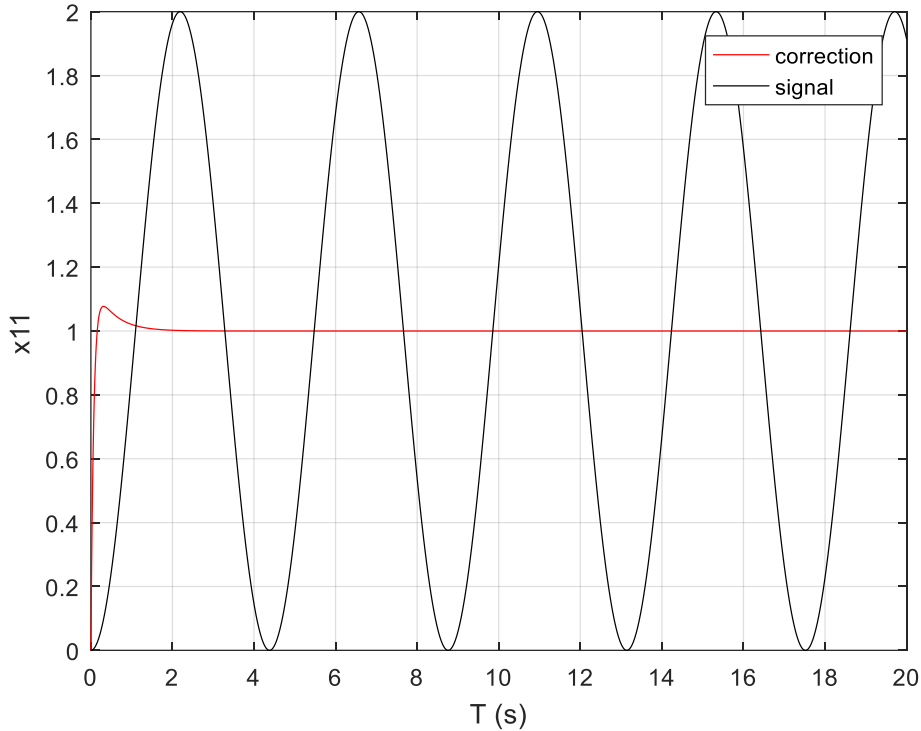


Figure.III.12. La réponse de la sortie x11

3)

Les pôles utilisés $K_p=10$; $K_i=40$; $K_d=0.01$.

Le graphe :

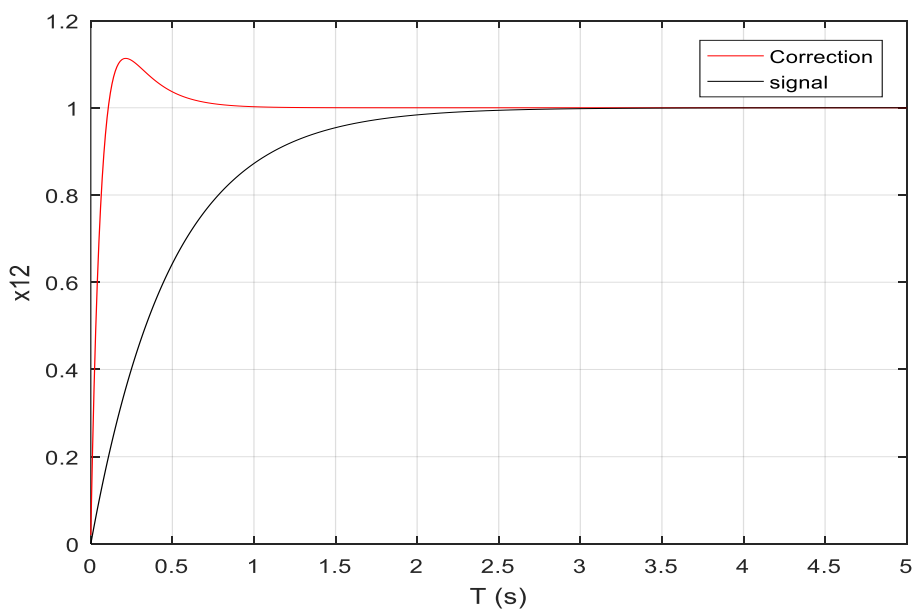


Figure.III.13. La réponse de la sortie x12.



4)

Les pôles utilisés $K_p=4$; $K_i=8$; $K_d=0$.

Le graphe :

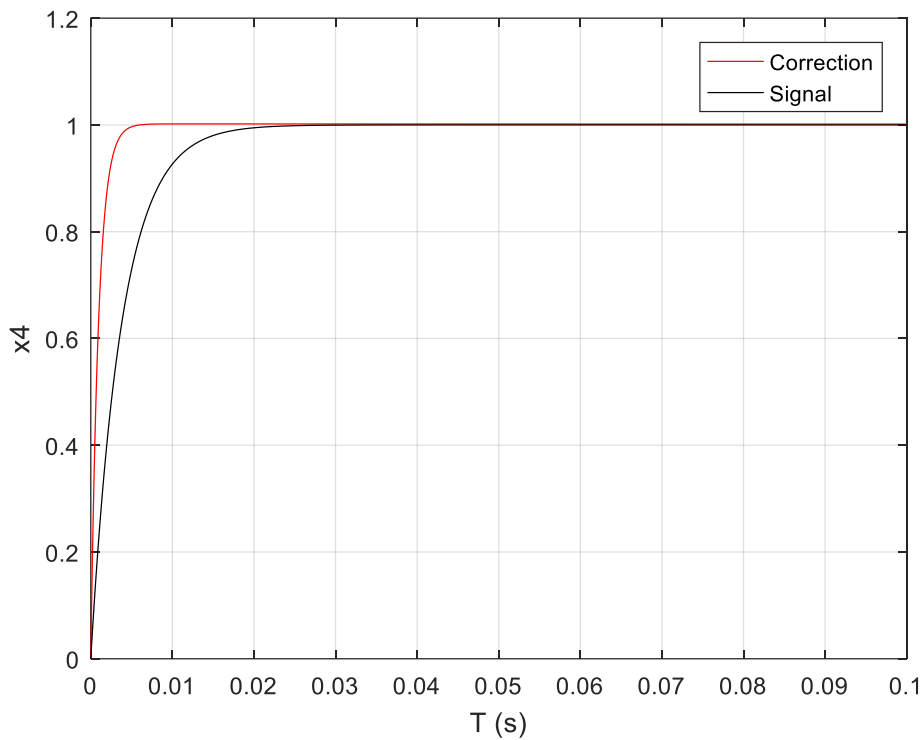


Figure.III.14. La réponse de la sortie x_4 .

5)

Les pôles utilisés $K_p=3$; $K_i=0.1$; $K_d=0.2$.

Le graphe :

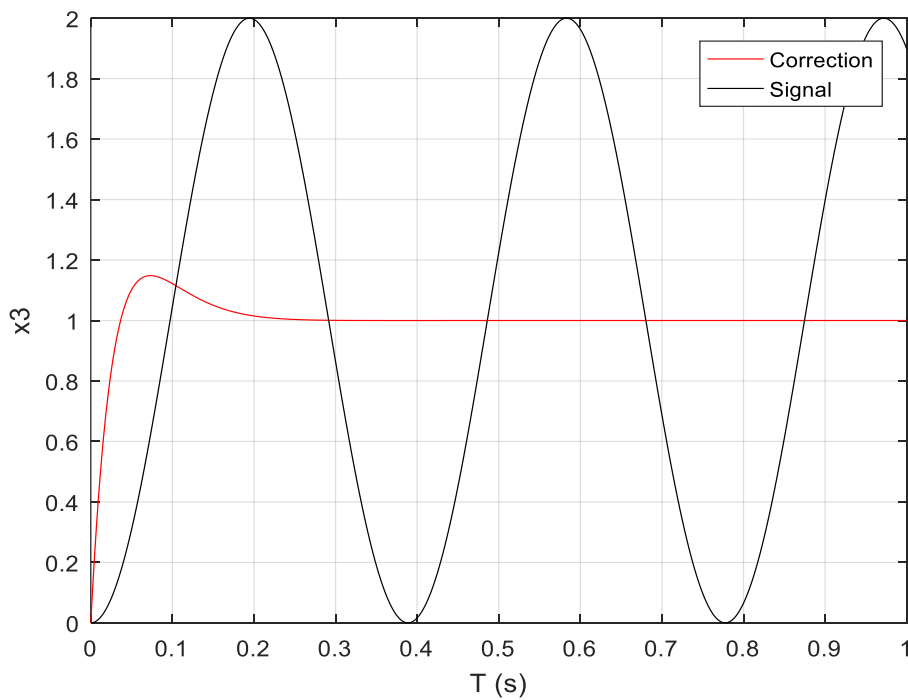


Figure.III.15. La réponse de la sortie x_3 .



Les figures suivantes représentent le mode latérale

Le premier test :

1)

Les pôles utilisés $K_p=0.8$; $K_i=2$; $K_d=0$.

Le graphe :

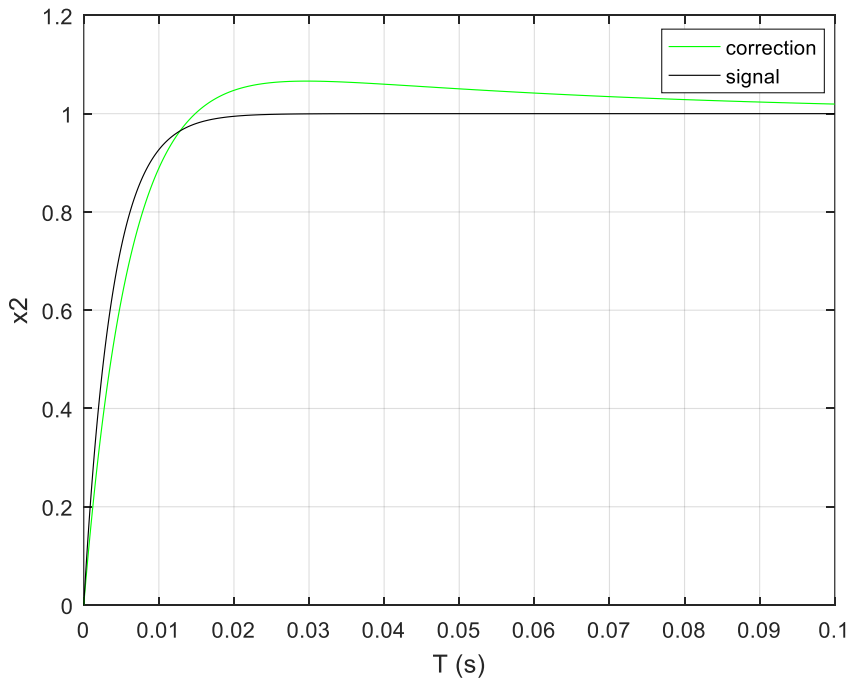


Figure.III.16. La réponse de la sortie x_2 .

2)

Les pôles utilisés $K_p=2$; $K_i=15$; $K_d=10^{-4}$.

Le graphe :

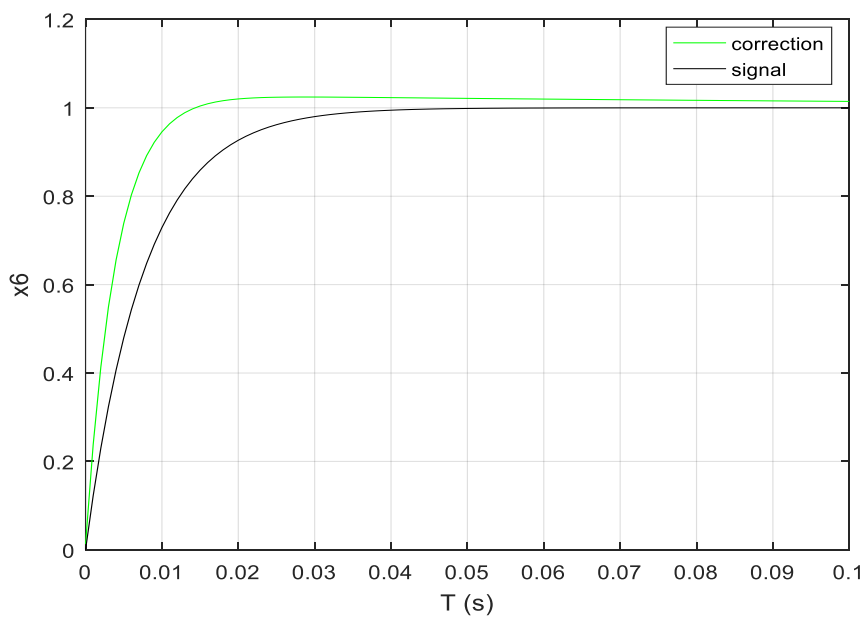


Figure.III.17. La réponse de la sortie x_6 .



3)

Les pôles utilisés $K_p=20$; $K_i=0$; $K_d=0.1$.

Le graphe :

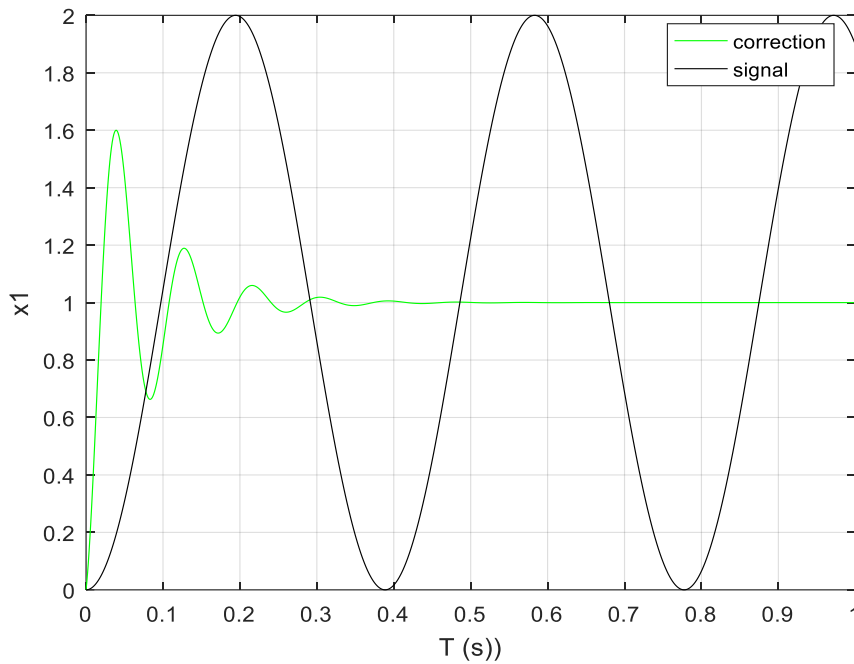


Figure.III.18. La réponse de la sortie x_1 .

4)

Les pôles utilisés $K_p=2$; $K_i=1$; $K_d=0.09$.

Le graphe :

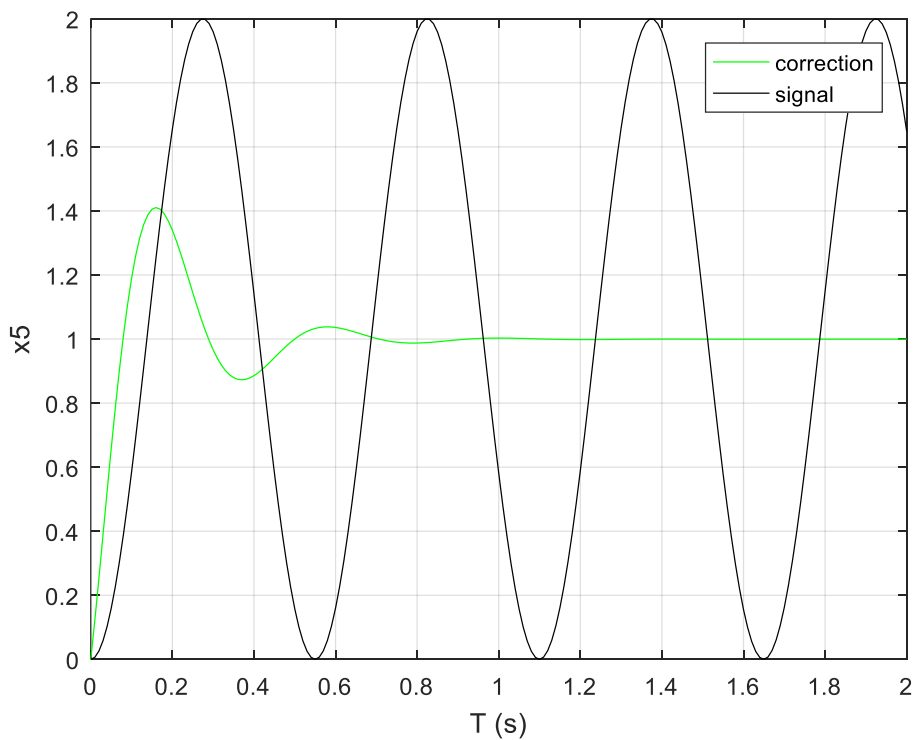


Figure.III.19. La réponse de la sortie x_5 .



Le deuxième test :

1)

Les pôles utilisés $K_p=5$; $K_i=5$; $K_d=0$.

Le graphe :

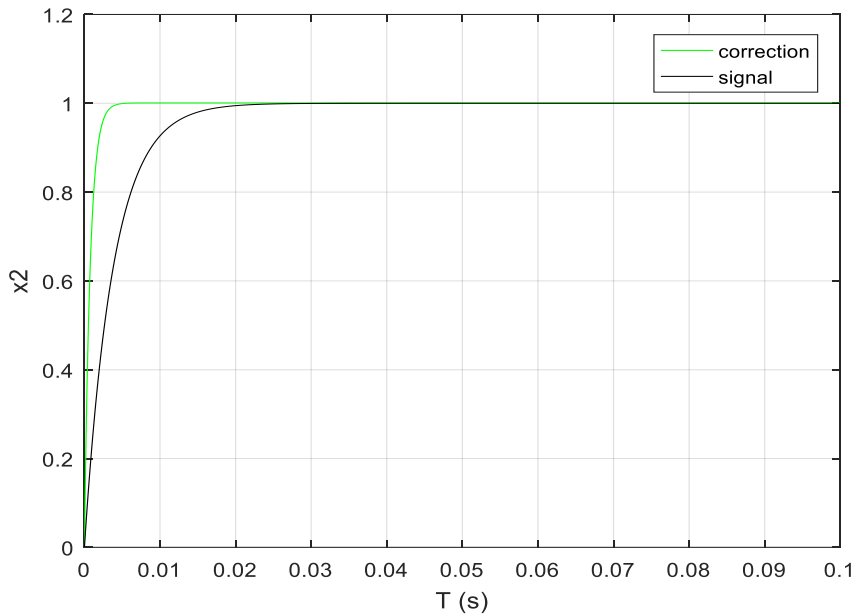


Figure.III.21. La réponse de la sortie x_2 .

2)

Les pôles utilisés $K_p=3$; $K_i=1$; $K_d=10^{-4}$.

Le graphe :

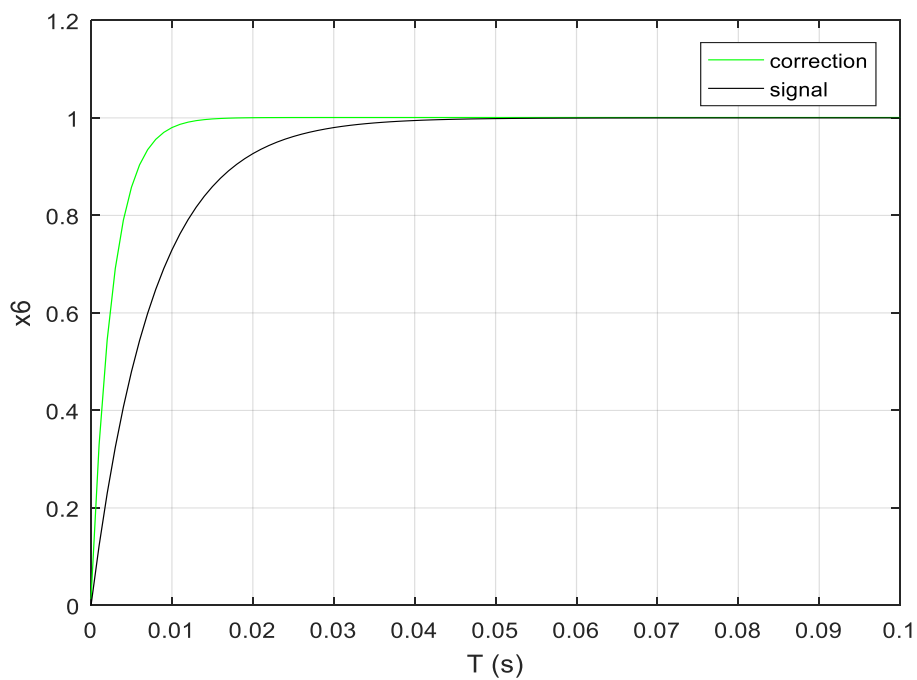


Figure.III.22. La réponse de la sortie x_6 .



3)

Les pôles utilisés $K_p=10$; $K_i=5$; $K_d=0.9$.

Le graphe :

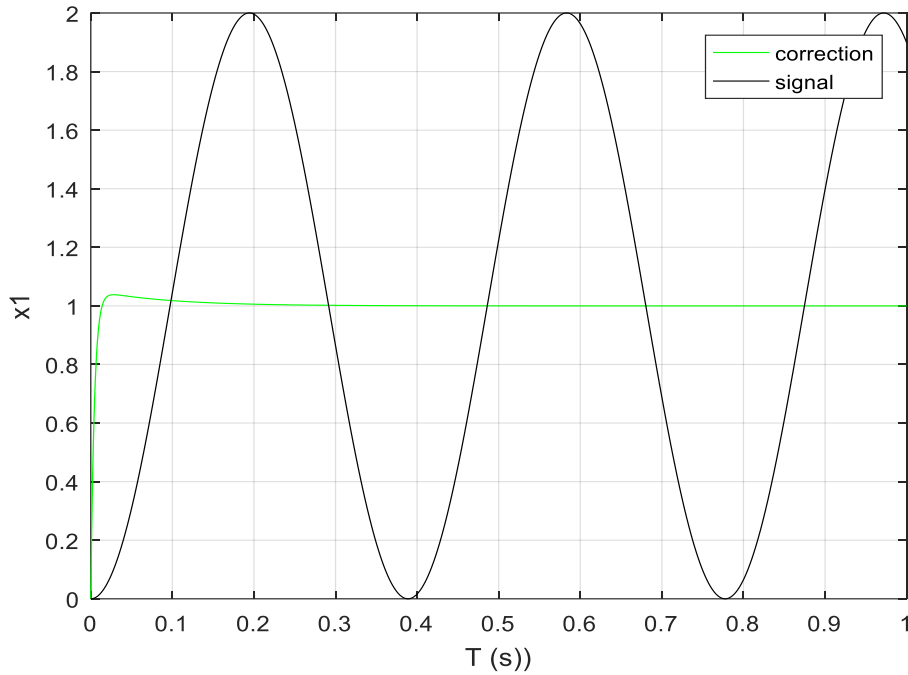


Figure.III.23. La réponse de la sortie x_1 .

4)

Les pôles utilisés $K_p=20$; $K_i=1$; $K_d=1.4$.

Le graphe :

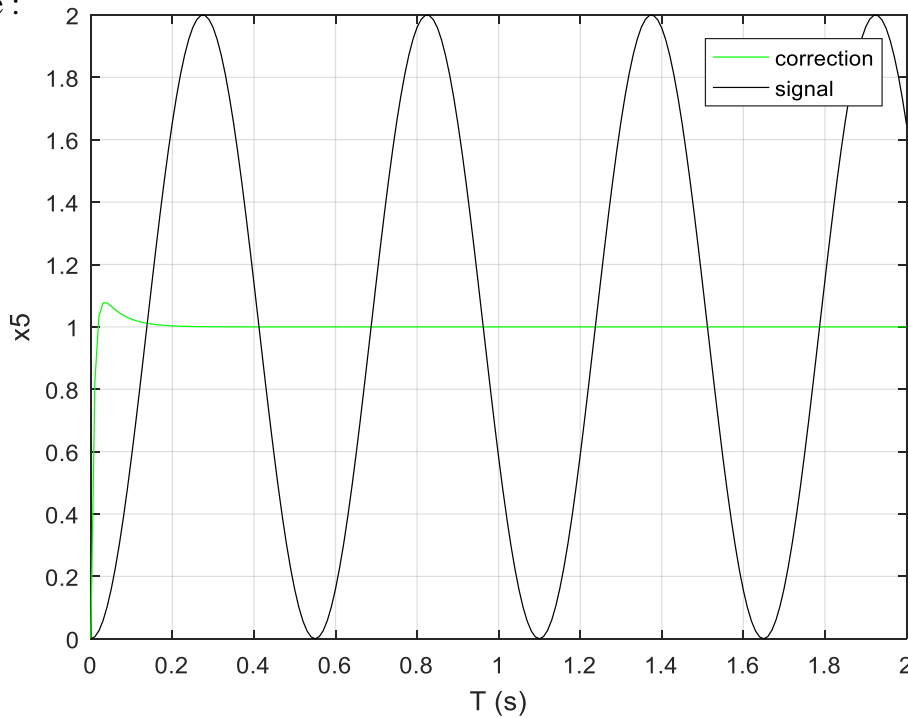


Figure.III.24. La réponse de la sortie x_5 .

**Discutions des résultats :**

La technique du placement des pôles (ou commande par retour d'état) permet la stabilité au système et mène les différents paramètres à la convergence tout en choisissant les gains pour chaque paramètres. Le choix des gains se fait d'une manière à diminuer l'amplitude du signal et l'approximer a l'amplitude de l'échelon.



IV. 1. Introduction

Dans ce chapitre, premièrement, on va mettre en évidence la structure de ce quadri-rotor, sa forme et la matière dont on va la réaliser. Deuxièmement on passera à voir presque tous les composants cruciaux nécessaires pour la construction. Toutes les pièces seront expliquées et des informations sur l'utilisation de chaque un seront données. En fin, le logiciel ; expliquant son utilisation et tous qui concerne sa carte Arduino.

IV. 2. Structure

La structure de ce quadri-rotor ce fait sous logiciel SolidWorks.

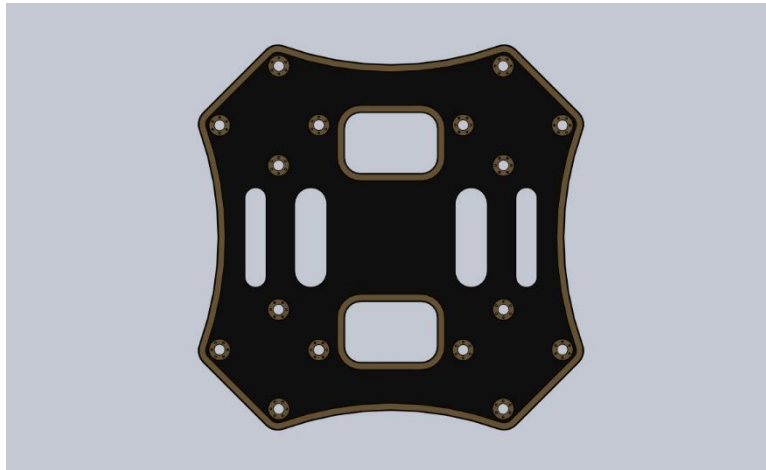


Figure IV.1. La base supérieure.

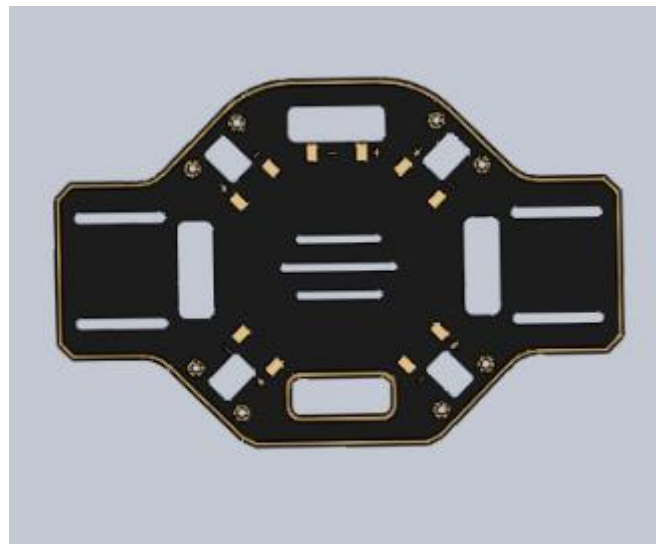


Figure IV.2. La base inférieure.

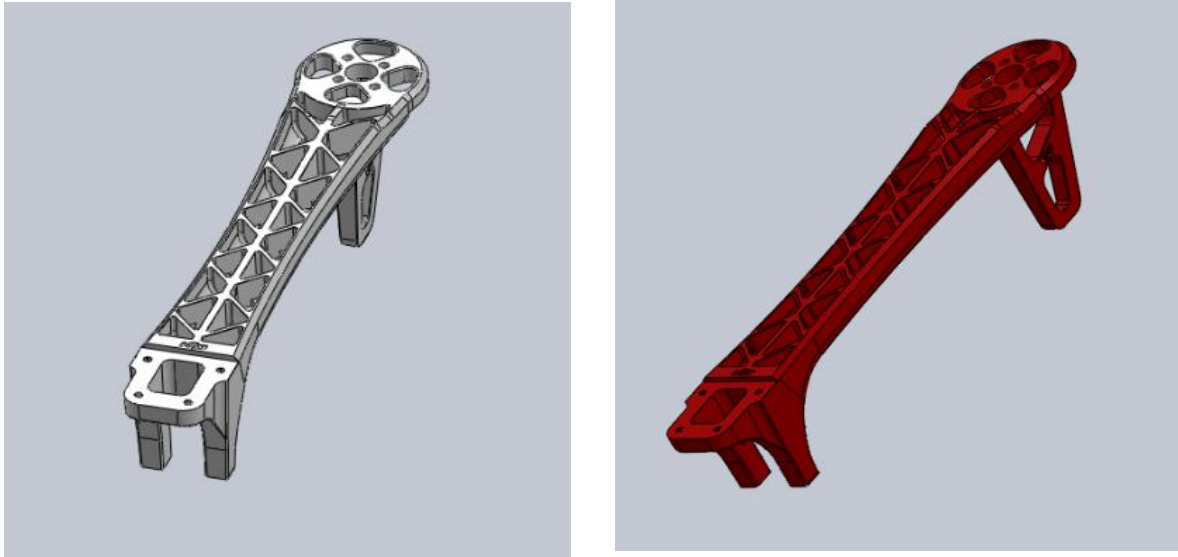


Figure IV.3. Le bras blanc et rouge.

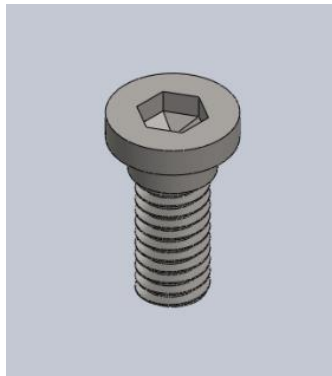


Figure IV.4. Un vis.

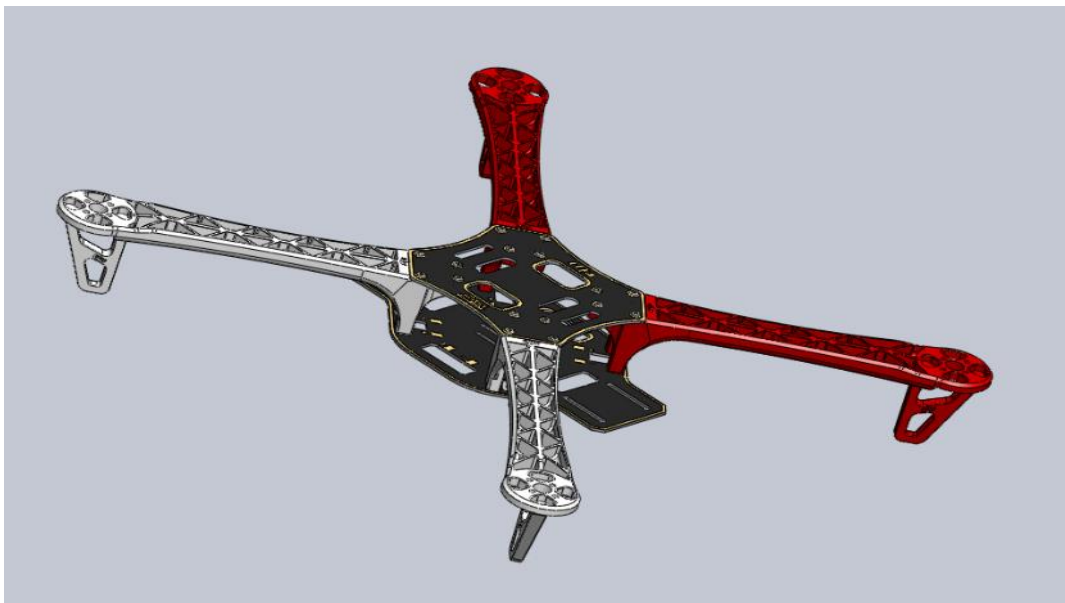


Figure IV.5. Assemblage des pièces.



IV. 3. Moteurs Brushless

Petit rappel : Comment fonctionne un moteur électrique ?

Avant de parler des moteurs brushless en particulier, un petit rappel du fonctionnement des moteurs électriques "traditionnels", c'est à dire à charbons, ne paraît pas superflu. Il faut savoir que, lorsqu'un courant passe dans un fil et que ce fil est soumis à un champ magnétique (aimant par exemple), ledit courant fait naître une force magnétique. Dans un moteur électrique, cette force, engendrée par le passage du courant dans les bobinages qui sont soumis au champ magnétique des aimants, est utilisée pour produire une rotation. Le moteur électrique est un "convertisseur" transformant l'énergie électrique en énergie mécanique... plus de la chaleur car le rendement n'est jamais de 100%. Pour créer le "champ tournant" des bobinages, il faut utiliser un système de commutation de manière à faire passer le courant dans ces bobinages dans un ordre précis et au bon moment. Dans un moteur à charbons ou balais (brushed en anglais), cette commutation des bobinages est réalisée mécaniquement par l'intermédiaire des lamelles du collecteur situées sur l'axe moteur. Lors de la rotation, les charbons sont successivement en contact avec ces lamelles qui vont transmettre le courant continu délivré par le variateur aux bobines du moteur. Le passage du courant dans le fil des bobines fait naître une force magnétique qui repousse les aimants de même pôle et attire ceux de pôles opposés. Ce système de commutation mécanique détermine l'architecture type d'un moteur à charbons qui comprend : un rotor interne portant les bobinages, et un stator externe où sont fixés les aimants. Cette commutation mécanique est facile à réaliser mais le frottement des charbons (ou balais) sur le collecteur entraîne une perte, un échauffement du collecteur et une usure inévitable de celui-ci. D'où un rendement relatif et la nécessité d'entretenir son moteur en vérifiant régulièrement l'état des charbons et du collecteur.

La machine synchrone, incapable de démarrer seule sur une source de courant alternative, est depuis longtemps utilisée uniquement comme génératrice. Avec l'apparition d'onduleurs à fréquence variable, elle est désormais utilisée comme moteur. Sa proximité de comportement et de fonctionnement (en remplaçant la commutation par collecteur par une commutation électronique) avec le moteur à courant continu conduisent à l'appeler « moteur à courant continu sans balais » : Brushless.

Note :

L'onduleur c'est la fonction inverse d'un redresseur.



Figure IV.6. Moteur brushless RCX 1804-2400 kv.



IV.3.1. Composition du moteur brushless

Un moteur Brushless comporte les mêmes éléments qu'un moteur à courant continu, excepté le collecteur, mais l'emplacement des bobines et des aimants permanents sont inversés. Le rotor est composé d'un ou plusieurs aimants permanents, et le stator de plusieurs bobinages.

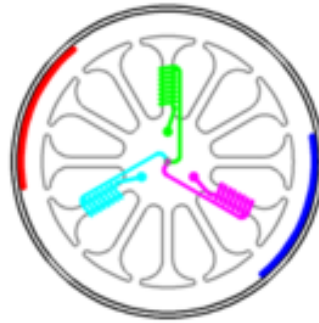


Figure IV.7.Moteur brushless.

Ce type de moteur électrique élimine tous les inconvénients du moteur à courant continu classique : problèmes de commutation au niveau du collecteur, défretage, inertie, refroidissement (les pertes de chaleur étant situées au stator, elles sont plus faciles à évacuer), puissance massique nettement plus grande, géométrie et durée de vie.

Note :

Défretage : Si le moteur tourne à une vitesse trop élevée, la force centrifuge peut endommager le système de fixation des bobinages du rotor

IV.3.2. Fonctionnement du moteur brushless simple

Les bobines sont alimentées de façon séquentielle. Cela crée un champ magnétique tournant à la même fréquence que les tensions d'alimentation. L'aimant permanent du rotor cherche à chaque instant à s'orienter dans le sens du champ. Pour que le moteur brushless tourne les tensions d'alimentation doivent être adaptées continuellement pour que le champ reste en avance sur la position du rotor et ainsi créer un couple moteur. La figure ci-contre montre le fonctionnement :

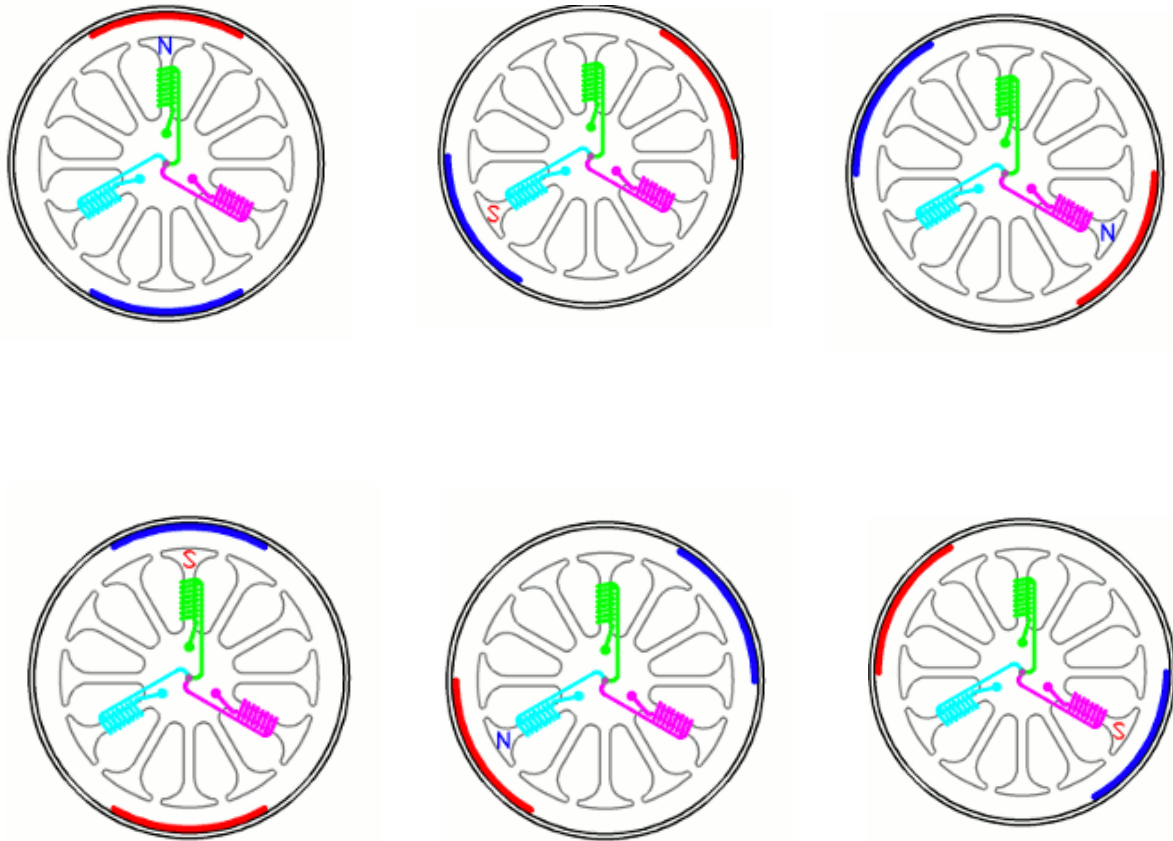


Figure IV.8. Fonctionnement du moteur brushless (sans balais).

IV.3.3. Caractéristiques importantes des moteurs brushless sont en général :

- Le poids, c'est le premier paramètre qu'on regarde quand on fait son choix.
- Le rendement en %, c'est le paramètre sur lequel il faut faire le moins de compromis possible.
- Le Kv : c'est un coefficient de vitesse, nombre de tours/min/volts, exemple : 2000kV sous 10V = 20 000 trs/min à vide, il est directement lié au nombre de tours de bobinage.
- Les pôles, nombre de pôles magnétiques du rotor de 2 à 6 pour des moteurs classiques.
- Le régime maximal, limitée mécaniquement par les roulements et le rotor, ou la tension maxi d'utilisation.
- La température maximale de fonctionnement.

IV.3.4. Les avantage

Les moteurs brushless ont beaucoup d'avantages par rapport au moteur à courant continu :

- L'absence de balais conduit à de meilleures performances énergétiques et une meilleure fiabilité.



- Les bobinages étant sur le stator, l'évacuation de la chaleur est plus facile et l'inertie est réduite (les bobinages de cuivre sur le rotor des moteurs à courant continu sont très lourds), ce qui améliore encore les performances énergétiques dans les applications nécessitant des accélérations et décélérations.
- Le rapport poids/puissance est meilleur et le coût des commandes électroniques triphasées est désormais inférieur au coût d'un collecteur.
- Pour les applications pointues, la commande de machine synchrone permet de contrôler précisément le champ magnétique dans la machine, et ainsi le couple généré, bien mieux que sur un moteur à courant continu.
- Le moteur brushless remplace progressivement le moteur à courant continu dans certains champs d'application, en particulier lorsque la masse ou la vitesse de rotation sont des critères importants.

IV.3.5. Les inconvénients :

- *Coût* : prix du moteur et du contrôleur sont excessifs.
- Consommation électrique.
- Une certaine maîtrise de l'engin est requise.
- Transmission a renforcé.
- Pièces de rechanges assez chers.

IV. 4. Contrôleurs de vitesse (ESC)

Un régulateur de vitesse électronique ou ESC est un circuit électronique qui contrôle et régule la vitesse d'un moteur électrique. Il peut également fournir une inversion du moteur et un freinage dynamique. Les commandes de vitesse électroniques miniatures sont utilisées dans les modèles radiocommandés électriques. Les véhicules électriques pleins grandeur ont également des systèmes pour contrôler la vitesse de leurs moteurs d'entraînement.



Figure IV.9.ESC Brushless.



Un contrôleur de vitesse ESC est composé de trois éléments clés : Un régulateur de tension BEC, un processeur et la commutation composée de transistors à effet de champ FET (Field Effect Transistor).

Le BEC est une division de l'ESC qui enverra une quantité définie d'énergie (généralement 5v 1Ah) au récepteur pour ensuite alimenter le servos. Cela a également une fonction secondaire selon laquelle si la batterie qui entraîne le moteur atteint sa tension minimale, le BEC (Battery Eliminator Circuit) réserve de l'énergie pour les commandes critiques de vol, s'assurant que le moteur ne tire pas toute la puissance de la batterie.

Le processeur est un circuit intégré qui de nos jours est complètement contenu dans une seule puce semi-conductrice en silicium. Son travail consiste à traduire les informations qui lui sont transmises par le récepteur dans le modèle et à commuter les FET pour réguler la puissance du moteur. Le FET est le composant qui fait tout le travail dans un ESC. Il "voit" la pleine tension et le courant de la batterie et du moteur. Un FET est essentiellement un interrupteur électronique qui coupe le flux d'électricité qui, à son tour, étrangle le moteur.

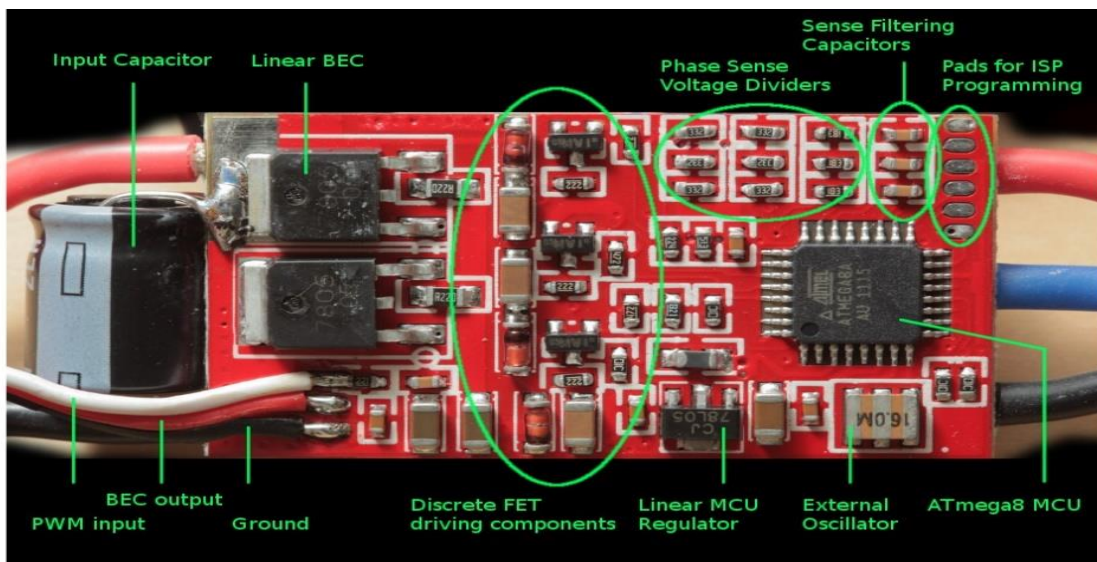


Figure IV.10. Les composants de l'ESC.

IV.4.1. Fonctionnement de la commande de vitesse électronique (ESC)

La définition basique des commandes de vitesse électroniques est qu'elles aident à contrôler l'information reçue du moteur et des transistors. La commande de vitesse électronique contrôle la fréquence à laquelle la commutation des transistors se produit à partir du contrôleur.

La commande de vitesse électronique reçoit un signal du moteur pour indiquer la position du rotor afin de pouvoir canaliser le transistor à activer et la cadence. La commande de vitesse électronique utilise les signaux de canal pour déterminer la puissance du moteur et la cadence désirée qui est envoyée par le contrôleur portable.



IV.4.2. Fonction Protection

Protection panne de démarrage : lorsque le moteur ne démarre pas dans les 2 secondes dès l'activation de l'accélérateur, l'ESC coupe la puissance de sortie. Dans ce cas, la manette de l'accélérateur doit être de nouveau déplacée vers le bas pour faire redémarrer le moteur. (Cette situation survient dans les cas suivants : la connexion entre l'ESC et le moteur n'est pas correcte, l'hélice ou le moteur sont bloqués ou la boîte des engrenages est endommagée, etc.).

Protection échauffement : lorsque la température de l'ESC dépasse les 110 degrés Celsius, l'ESC réduit la puissance de sortie.

Protection signal accélérateur : L'ESC réduit la puissance de sortie si l'on perd le signal de l'accélérateur pour 1 seconde, tandis que si l'on perd le signal pour plus de 2 secondes, la puissance sera coupée.

IV.4.3.L'objectif des commandes de vitesse électroniques (ESC)

Eh bien, le but des commandes de vitesse électroniques est de créer un équilibre entre la puissance disponible et la quantité requise. Les ESC cherchent à équilibrer la puissance disponible et la quantité requise, mais elles visent à fournir cette information de la manière la plus efficace et la plus opportune.

IV.5. Batterie

IV.5.1. Les ACCUS LIPO

Les batteries au lithium-polymère, aussi appelée accu LiPo sont aujourd'hui utilisées dans de nombreux véhicules électroniques grand public. Elles sont devenues très populaires dans le modélisme grâce à leur petite taille, leur légèreté et leurs performances élevées. Elles présentent néanmoins certains inconvénients comme leur fragilité et une durée de vie relativement courte (entre 150 et 250 cycles de charge).



Figure IV.11. Batterie Lipo.



IV.5.2. Quelle est la signification des indications présentes sur les batteries ?



Figure IV.12. Les chiffres de la batterie Lipo.

Voltage : La tension électrique de la batterie est exprimée en Volt (V). Plus la tension nominale est élevée, plus la réactivité et la cadence de la réplique le sont aussi. Attention toutefois à prendre quelques précautions. En effet, si la réplique est une entrée de gamme et que le voltage est trop élevé, il existe un risque de casse non négligeable. La plupart du temps, c'est un engrenage ou le piston qui rendra l'âme bien plus tôt que prévu.

La capacité : exprimée en milliampère heure (mAh), correspond à la quantité d'énergie qu'est capable de stocker la batterie. Plus elle est élevée, plus l'autonomie est importante. Contrairement au voltage, elle n'a cependant aucune incidence sur l'intégrité de la réplique.

Le taux de décharge : les batteries Li-Po bénéficient d'un **indice de taux de décharge** se terminant par la lettre C (par exemple « 25C »). Plus cet indicateur est élevé, plus la batterie est performante.

IV.5.3. Comment prendre soin de la batterie ?

Si on recharge une LiPo, on prend garde à utiliser un chargeur de batterie adapté, si possible disposant d'un delta peak. Ce dispositif permet de couper la charge, une fois la batterie pleine.

Le stockage d'une batterie, quelle que soit sa technologie, s'effectue toujours dans un endroit sec, à température ambiante. Sache qu'il existe des sacs de stockage spécifiquement conçus pour les batteries LiPo.



Figure IV.13. Sac de stockage pour Lipo.



Enfin, si on souhaite tester une batterie, on a le choix entre utiliser un analyseur de batterie, un moniteur de voltage ou un buzzer, qui sonne en cas de baisse de puissance.

IV.6. Hélice

Les hélices sont des éléments indispensables du système de propulsion du quadri-rotor. Formées de plusieurs pales disposées régulièrement autour d'un axe, elles se fixent à l'aide d'écrous ou de clips sur le bras de chaque moteur du quadri-rotor. Chacune d'elles doit posséder son propre moteur, appelé « rotor ». Il en découle donc que le nombre d'hélices est identique au nombre de moteurs.

La rotation des hélices générée par la puissance du moteur permet la propulsion du quadri-rotor. Effectivement, ce dispositif rotatif (le mouvement rotatif) produit une force de poussée sur les pales de l'hélice. De ce fait, le quadri-rotor peut décoller et se déplacer dans l'espace environnant à une vitesse contrôlée par le pilote.

De toute évidence, leur rôle est également déterminant pour assurer une bonne stabilisation du quadri-rotor en vol, et ainsi permettre des prises de vues aériennes optimales.



Figure IV.14. Hélice d'un moteur Brushless.

IV.6.1. les hélices du quadri-rotor

En règle générale, les quadri-rotors sont composés de quatre hélices. On les appelle quadricoptères. Ils sont de tailles différentes et s'adaptent à différentes utilisations.

Ce type de quadri-rotor est léger, peu encombrant et donc facile à transporter. Il bénéficie d'une bonne stabilité en vol et reste financièrement très abordable. Pour l'apprentissage du pilotage, le pilote débutant trouvera entière satisfaction avec un quadricoptère.

Il existe également des drones hexacoptères et octocoptères qui disposent respectivement de six et huit hélices. Ils sont plus répandus dans le domaine professionnel.

Quel que soit le nombre d'hélices, il faut respecter le principe de rotation alternée et inversée. Effectivement, un quadri-rotor fonctionne avec des hélices à rotation horaire appelées hélices CW (clockwise : sens des aiguilles d'une montre) et avec des hélices à rotation antihoraire appelées hélices CCW (counter clockwise : sens inverse des aiguilles d'une montre).



Il est indispensable que chaque duo d'hélices tournant dans le même sens soit placé aux extrémités opposées d'une branche du châssis.

IV.6.2. Les caractéristiques des hélices

Il existe une abondante diversité d'hélices caractérisées par une forme ou un nombre de pales différents, ou par un diamètre ou un pas variés. Toutes les caractéristiques doivent être prises en compte pour les qualités en vol de chaque drone. Les caractéristiques de l'hélice et celles du moteur doivent être en adéquation avec la puissance du moteur.

– Le nombre de pales sur une hélice :

La pale désigne l'élément en forme d'aile vrillée avec un profil aérodynamique constituant l'hélice. Elle dispose d'un bord d'attaque et d'un bord de fuite.

Une hélice avec deux pales est appelée hélice bipale. Une hélice avec trois pales est nommée hélice tripale. Une hélice avec quatre pales est nommée quadri pôle.

La plupart des drones sont constitués d'hélices à deux ou trois pales, la version la plus courante étant trois. En règle générale, le nombre de pales sur les hélices agit sur la maniabilité du drone (plus une hélice dispose de pales, moins elle génère de vibration) et sur la consommation des moteurs (plus le nombre de pales augmente, plus la poussée est grande ; la force de l'hélice s'accroît ainsi que la consommation du moteur).



Figure IV.15. Hélice à quatre, trois, deux pales.

– La longueur des pales et le diamètre d'une hélice :

La longueur des hélices est exprimée en pouces. Il faut tracer un cercle autour des pales ou mesurer deux fois la distance entre l'axe de rotation de l'hélice et l'extrémité d'une pale pour connaître son diamètre. Cette valeur doit correspondre avec la taille du châssis du quadri-rotor.

Le diamètre d'une hélice agit sur la portance du quadri-rotor et sur ses accélérations. Il est gravé sur chaque hélice.

– Le pas géométrique d'une hélice :

Exprimée en pouces, le pas géométrique correspond à la distance théorique parcourue par l'hélice en un tour. Si l'on manque de pas, le quadri-rotor risque de « voler plus » que l'hélice. Dans le cas contraire, l'hélice soufflera à une vitesse que le quadri-rotor ne pourra pas atteindre. Tout comme le diamètre de l'hélice, le pas est gravé sur chaque hélice



I.V.6.3. Les matériaux qui composent les hélices

Les hélices des drones sont des accessoires qui peuvent être rapidement endommagés ou déformés. Le matériau plastique (ABS, nylon ou polycarbonate) est donc le plus utilisé pour les hélices et le plus populaire car il offre un bon rapport qualité prix.

Note : ABS (Acrylonitrile Butadiène Styène).

IV.7. MPU6050

Le MPU6050 est essentiellement un capteur pour les appareils de traitement de mouvement. Il s'agit du premier appareil de suivi des mouvements à six dimensions au monde. Il a été conçu pour les smartphones, tablettes et capteurs portables à faible coût et hautes performances. Il est capable de traiter des algorithmes à neuf axes, il capture le mouvement dans les axes X, Y et Z en même temps.

Le MPU6050 est utilisé dans différents projets industriels et appareils électroniques pour contrôler et détecter le mouvement 3D de différents objets.

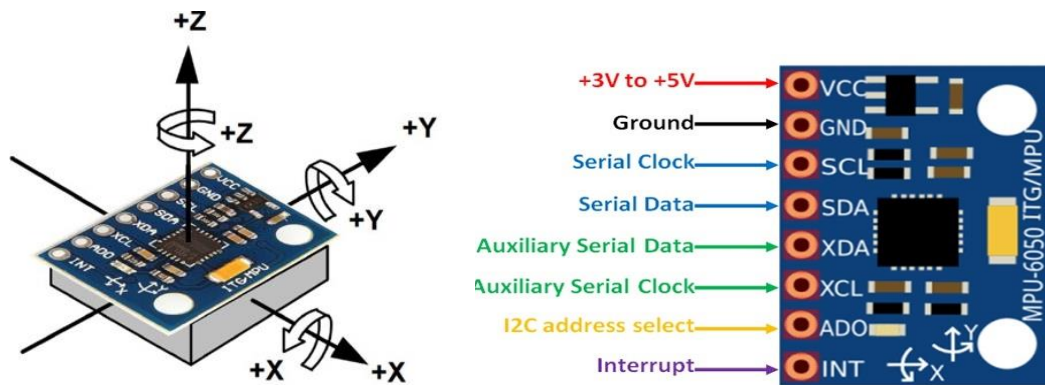


Figure IV.16. MPU6050.

- Le MPU6050 est un système micro-électromécanique (MEMS), il se compose d'un accéléromètre à trois axes et d'un gyroscope à trois axes. Il nous aide à mesurer la vitesse, l'orientation, l'accélération, le déplacement et d'autres caractéristiques similaires au mouvement.
- Le MPU6050 se compose d'un **processeur de mouvement numérique (DMP)**, qui a la propriété de résoudre des calculs complexes.
- Le MPU6050 se compose d'un matériel de conversion analogique-numérique 16 bits. Grâce à cette fonctionnalité, il capture le mouvement en trois dimensions en même temps.
- Ce module a des fonctionnalités célèbres qui sont facilement accessibles, en raison de sa disponibilité facile, il peut être utilisé avec un célèbre microcontrôleur comme Arduino.
- Ce module utilise le module I2C pour l'interfaçage avec Arduino.
- Le MPU6050 est moins cher, sa principale caractéristique est qu'il peut facilement être combiné avec un accéléromètre et un gyroscope.



IV.7.1. Brochage et description

Il y a un huit broches (PINOUT) principal de MPU6050, qui sont décrits ici:

| Brochage MPU6050 | | |
|------------------|--------------------------------|---|
| Epingle | Nom de broche | La description |
| 1 | VCC | Cette broche utilisée pour la tension d'alimentation. Sa tension d'entrée est de +3 à + 5V. |
| 2 | GND | Cette broche utilise pour la masse |
| 3 | SDL | Cette broche est utilisée pour l'impulsion d'horloge pour la fonction I2C |
| 4 | SDA | Cette broche est utilisée pour le transfert de données via la communication I2C. |
| 5 | Données série auxiliaire (XDA) | Il peut être utilisé pour d'autres modules I2C interfacés avec MPU6050. |
| 6 | Horloge série auxiliaire (XCL) | Il peut également être utilisé pour d'autres modules I2C interfacés avec MPU6050. |
| 7 | AD0 | Si plusieurs MPU6050 sont utilisés pour un seul MCU, cette broche peut être utilisée pour faire varier l'adresse. |
| 8 | Interruption (int) | Cette broche est utilisée pour indiquer que les données sont disponibles pour MCU à lire. |

Tableau IV.1. Brochage de MPU6050.

IV.7.2. Caractéristiques du MPU6050

- Le MPU6050 est le premier appareil de suivi de mouvement à six mouvements.
- Le protocole de communication sur lequel il opère est I2C.
- Il est construit en 16 bits ADC, qui offre une grande précision.
- Sa tension de fonctionnement est de 3 à 5 volts.
- Il se compose d'un processeur de mouvement numérique, qui fournit une puissance de calcul élevée.
- Il est intégré dans le capteur tempéré.
- Il peut être utilisé pour interfacer avec des appareils IIC comme un magnétomètre.
- Le pas de ses broches est de 0,1 pouce.
- Sa plage d'accélération est de +/- 2g, +/- 4g, +/- 8g, +/- 16g.



- Ses dimensions (hors broches) sont de 21,2 mm (0,84 ") de longueur x 16,4 mm (0,65 ") de largeur x 3,3 mm (0,13 ") de hauteur.
- Son poids est de 2,1 g.
- Il possède le boîtier QFN le plus petit et le plus fin pour les appareils portables, 4x4x0,9 mm
- Son courant de fonctionnement est de 3,9 mA lorsque ses six axes de détection de mouvement et DMP sont en mouvement.
- Il a également une fonction de gyroscope comme son courant de fonctionnement du gyroscope est de 3,6 mA.
- Son courant gyroscopique de maintien est de 5 μ A. Il présente également de faibles performances améliorées de bruit de fréquence.
- Il fonctionne dans la gamme Gyroscope, ± 250 500 1000 2000 $^{\circ}$ / s.

I.V.7.3. Protocole I2C

Le MPU6050 fonctionne sur le protocole I2C, on discute maintenant de ce protocole.

- Le MPU6050 a été introduit pour la première fois par les semi-conducteurs Philips en 1982. Pour envoyer et recevoir des données entre deux appareils ou plus, nous avons besoin d'un chemin appelé BUS. I2C est un bus bidirectionnel à deux fils qui sert à envoyer des données entre les circuits intégrés.
- I2C se compose de trois vitesses de transfert de données, soit le mode standard, le mode rapide et le mode haute vitesse. I2C arbore des périphériques d'adresse 7 bits et 10 bits.
- I2C est le meilleur choix où la simplicité et le faible coût de fabrication sont plus importants que la vitesse.

Pour une meilleure compréhension du fonctionnement du protocole I2C, la figure IV.7.2 illustre ce cas.

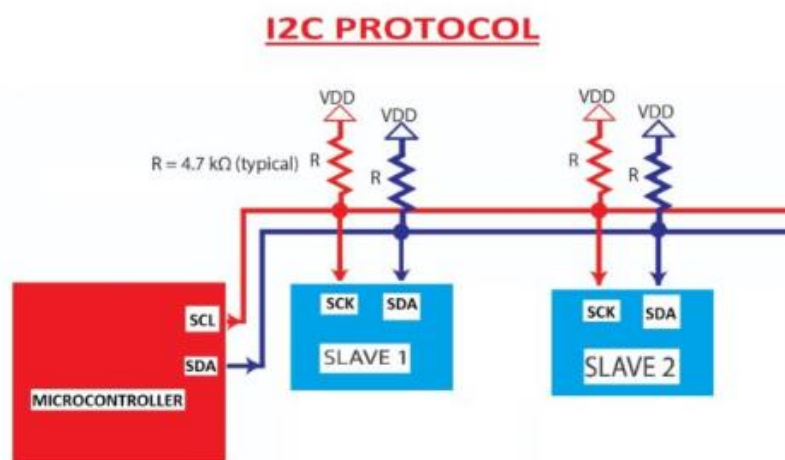


Figure IV.17. Protocole I2C.



IV.7.4. Application de MPU6050

- Il est utilisé pour la mesure IMU.
- Il peut être utilisé dans les drones comme contrôleur de direction.
- Il est utilisé dans les robots auto-équilibrés.
- Il peut être utilisé comme commandes de bras robotiques.
- Il peut être utilisé dans les robots humanoïdes
- Il est utilisé dans le capteur d'inclinaison.
- Il peut être utilisé comme détecteur d'orientation ou de rotation.
- Il peut s'agir de combinés et de jeux portables.
- Il a utilisé des contrôleurs de jeu basés sur Motion.
- Il est utilisé dans les télécommandes 3D pour les téléviseurs et décodeurs connectés à Internet, les souris 3D.

IV.8. Télécommande et récepteur

IV.8.1. La manette PS2

La manette PS2 (PlayStation) est manette de jeu **DualShock2** son nom fait référence à la présence de doubles moteurs solénoïdes, qui permettent de produire des vibrations dans le contrôleur est réputée pour être une des meilleures manettes construites jusqu'à maintenant. En effet, son ergonomie, sa robustesse et ses deux sticks analogiques vous offrent un confort d'utilisation impressionnant.



Figure IV.18. Manette PS2.

La manette contient une batterie, quatre boutons faciaux, quatre boutons d'épaule, deux sticks analogiques, deux moteurs solénoïdes, un bouton de démarrage et de sélection et un pavé de contrôle.

Note :



Ses sticks analogiques et ses boutons proposent des degrés de sensibilité plus importants.

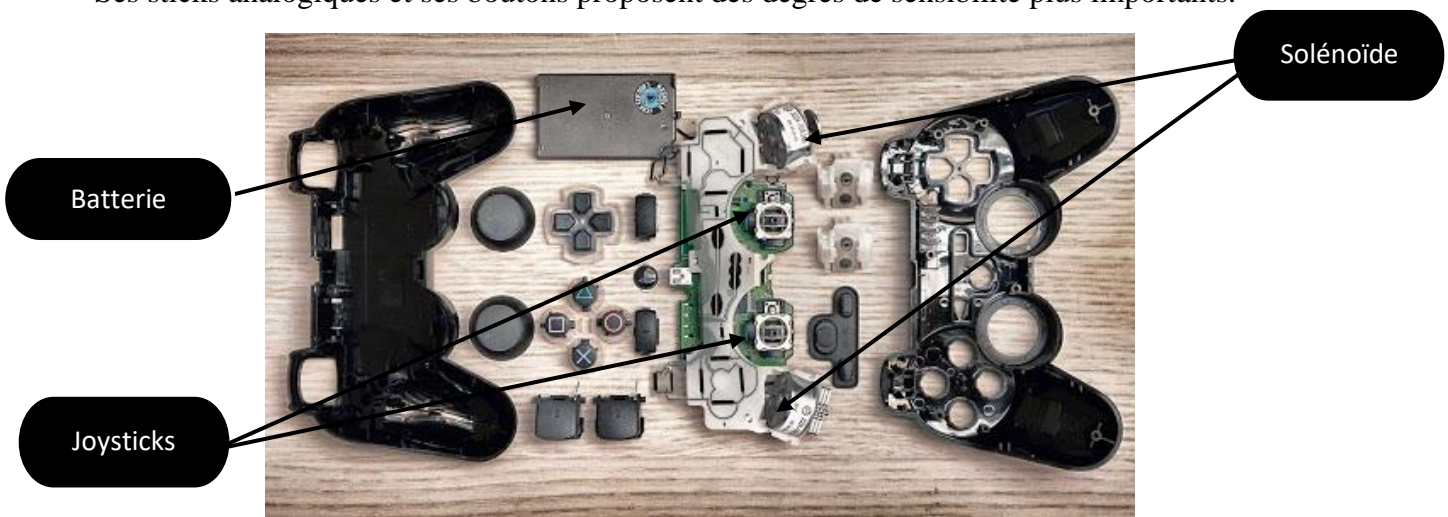


Figure IV.19. Description de la manette PS2.

IV.8.1.1. Le joystick analogique

Le joystick analogique est similaire à deux potentiomètres connectés ensemble, l'un pour le mouvement vertical (axe Y) et l'autre pour le mouvement horizontal (axe X). Le joystick est également livré avec un commutateur Select. Il peut être très pratique pour le contrôle de robots.



Figure IV.20. Joystick analogique.

L'Arduino Nano ou toute autre carte Arduino qui utilise Atmega328 comme microcontrôleur a une résolution ADC de 10 bits. Par conséquent, les valeurs sur chaque canal analogique peuvent varier de 0 à 1023. Maintenant, la connexion des entrées analogiques VRx à A0 et VRy à A1 devrait afficher les valeurs comme indiqué dans l'image ci-dessous.

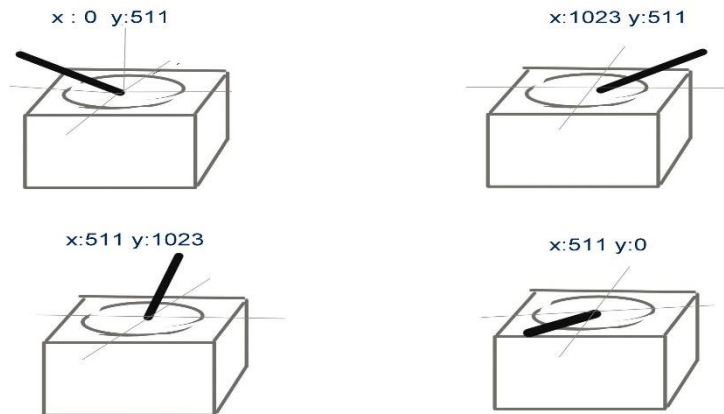


Figure IV.21. Le diagramme de joystick.

La position d'origine du bâton est à (x, y: 511 511). Si le manche est déplacé sur l'axe X d'une extrémité à l'autre, les valeurs X changeront de 0 à 1023 et une chose similaire se produit lorsqu'il est déplacé le long de l'axe Y. Sur les mêmes lignes, on peut lire la position du bâton n'importe où dans la moitié supérieure de l'hémisphère à partir de la combinaison de ces valeurs

IV.8.2. Le nRF24L01 + PA + LNA

Le NRF24L01 est un module de type émetteur-récepteur fonctionnant en 2.4Ghz de Nordic semi-conducteur et disposant d'un connecteur SMA à polarisation inversée pour une portée maximale. De plus grâce au circuit PA et LNA il intègre une antenne externe permettant d'atteindre des distances plus importantes de ceux sans antenne externe.



Figure IV.22. Le nRF24L01 + PA + LNA

I.V.8.2.1. La description détaillée

- Émetteur-récepteur sans fil 2,4 GHz compatible Arduino et Raspberry Pi.
- Comprend une antenne de canard 2,4 GHz 2,2 dBi.



- Signal PA (amplificateur de puissance) et LNA (amplificateur à faible bruit) étend considérablement la portée de ce module.
- Applications: périphériques sans fil, systèmes de contrôle à distance tels que les véhicules RC et l'électronique à distance grand public, transmission vocale sans fil telle que VoIP, réseaux de capteurs sans fil, réseaux sans fil, domotique et domotique commerciale

IV.8.2.2. Les caractéristiques

- Le nRF24L01 + est un émetteur-récepteur à bande ISM 2,4 GHz.
- Portée: ligne de visée 800+ mètres.
- Comprend des composants de support embarqués et le RFX2401C qui est le PA (amplificateur de puissance) et le LNA (amplificateur à faible bruit).
- Un microcontrôleur hôte peut communiquer et configurer le nRF24L01 + via une interface périphérique série (SPI) à 4 broches. Les registres de configuration sont accessibles via la connexion SPI. Les paramètres configurables incluent le canal de fréquence (125 canaux sélectionnables), la puissance de sortie et le débit de données (débits de données: 250 kbps, 1 Mbps et 2 Mbps).
- Le régulateur de tension sur puce accepte des tensions d'alimentation de 1,9 à 3,6 V.
- Le module possède des entrées tolérantes 5 V qui permettent une connexion directe des broches SPI à l'Arduino.
- Le filtrage interne se traduit par des marges élevées pour répondre aux normes réglementaires RF. La radio du module utilise la modulation Gaussian Frequency-Shift Keying (GFSK) ainsi que le contrôle automatique de gain rapide (AGC).
- Le module comprend une broche de demande d'interruption (IRQ) qui peut être utilisée pour réveiller le microcontrôleur hôte, (ex: Arduino), du sommeil lorsque le module reçoit une transmission offrant une grande économie d'énergie dans les appareils à batterie.
- Capacités de reconnaissance automatique et de retransmission automatique.
- Poids: 13,28 g (0,468 oz).
- Dimensions de la carte, hors broches: 15,5 mm (0,61 ") de largeur x 40,7 mm (1,6") de longueur x 12,2 mm (0,48 ") de hauteur.



- Dimensions de l'antenne, lorsqu'elle est inclinée à 90 degrés: 87 mm (3,43 ") de hauteur x 9,5 mm (0,37") de diamètre.

Note :

Pour maximiser la distance d'émission / réception (plage), nous recommandons ce qui suit:

- En utilisant un débit de données plus lent, de préférence 250 kbps
- En plus de la broche d'en-tête GND, nous vous recommandons également de connecter votre terre de source aux trous traversant ou aux créneaux de terre près du connecteur d'antenne en laiton.
- Ajout d'un condensateur 10uF sur GND et V + pour répondre aux demandes de puissance pendant la transmission et la réception.
- En utilisant une source d'alimentation dédiée de 3,3 V au lieu de l'alimentation 3,3 V d'un Arduino, un bon régulateur de 3,3 V tel que le LD33V fonctionne bien.

IV.9. Logiciels

Le choix d'un microcontrôleur pour faire de la programmation dépend en réalité des situations. Autrement dit, il faut trouver ce qui convient idéalement au type de projet que l'on souhaite réaliser. Cet état de choses peut malheureusement limiter les travaux.

Heureusement, il existe un microcontrôleur capable de s'adapter à toute situation : l'Arduino. La carte Arduino est un élément fiable et capable d'exécuter un programme complet. Elle représente la solution adaptée pour contrôler l'électronique.

IV.9.1. Arduino

L'Arduino Nano est une carte électronique de dimensions 45mm x 18mm. Très légère, elle ne pèse que 5g, ce qui lui permet de s'adapter aux petits systèmes électroniques embarqués et aux petits robots.

Elle est dotée de 14 pins digitaux à travers lesquels elle fournit 40 mA maximum. En outre, elle intègre 2 pins analogiques. Cela fait donc 8 pins analogiques pour la Nano. En ce qui concerne la capacité, elle est dotée d'une mémoire Flash de 32Kb et 2Kb de mémoire dynamique. Elle est basée sur ATmega 328 couplé à un quartz de 16 MHz.

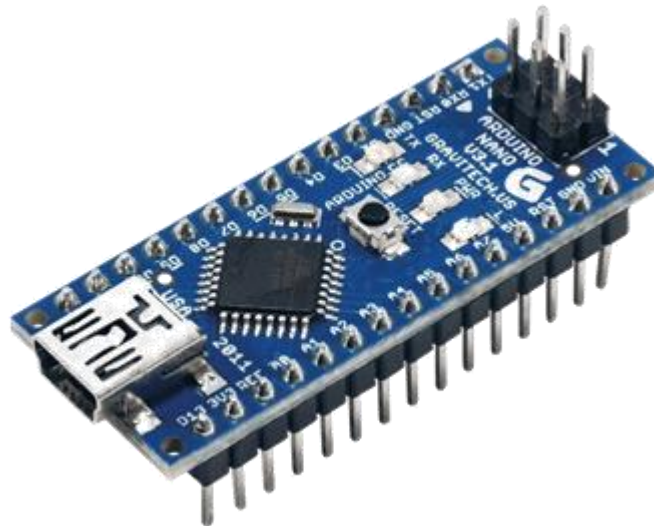


Figure IV.23. Carte arduino Nano V3.0.

IV.9.1.1. Les caractéristiques techniques générales de l'Arduino Nano

| | |
|---|---|
| Microcontrôleur | ATMega328 |
| Mémoire flash | 32 ko |
| Mémoire SRAM | 2 ko |
| Mémoire EEPROM | 1 ko |
| Entrée/ Sortie | 20 broches d'entrées et sorties, dont 6 broches PWM et 6 broches d'entrées analogiques 10 bits |
| Entrée analogique 10 bits | 2 broches uniquement |
| Fréquence d'horloge | 16 MHz |
| Bus série, I2C et SPI | |
| Prise USB | mini-USB B |
| Dimensions | 45 x 18 x 18 mm |
| Poids | 5 g |
| Tension d'alimentation (maximum) | 6-20v |
| Tension d'alimentation (recommandée) | 7-12V |
| Tension de fonctionnement (niveau logique) | 5V |
| Courant par entrées-sorties | 40 mA |

Tableau IV.2. Les caractéristiques l'Arduino Nano.



IV.9.1.2.Fonctionnement de la carte Arduino Nano

Pour fonctionner, la carte Nano a besoin d'être alimentée par une prise mini-USB. Il est également possible d'utiliser une source d'énergie externe avec les caractéristiques suivantes 6-20V (pin 30). On peut également se servir d'une source d'énergie externe non régulée à 5 V (pin 27).

IV.9.1.3.Les avantages de l'Arduino Nano

L'Arduino Nano présente de nombreux avantages non négligeables :

- La taille : la connexion au PC se fait à l'aide d'un câble micro-USB. Du fait de sa taille, la Nano s'avère un outil très utile et pratique pour les débutants en programmation ou pour ceux qui souhaitent faire de la programmation par pur loisir. Sa taille minimale est un véritable atout pour les professionnels qui souhaitent réaliser des projets nécessitant la conception de systèmes légers.
- Un prix très faible : la Nano est moins cher.
- Une puissante communauté : l'un des arguments forts de l'Arduino concerne sa communauté. En effet, elle dispose d'une communauté dynamique et réactive qui permet aux projets de prendre forme. Cette plate-forme d'entraide est composée de professionnels et d'amateurs partageant une passion commune : la programmation.
- Compatibilité avec une planche à pain : Par rapport aux autres cartes Arduino au format plus grand, l'Arduino Nano a une longueur d'avance, car elle ne présente pas un espacement irrégulier de broches. Cela lui permet donc d'être adaptée sur une planche à pain Arduino.

IV.9.1.4.Les inconvénients de l'Arduino Nano

Si l'Arduino Nano présente quelques avantages, elle n'est cependant pas exempte de reproches. Voici quelques points à classer dans les inconvénients :

- Manque d'options de connectivité : La plupart des cartes Arduino manquent d'options de connectivité. Et la carte Arduino Nano ne fait pas l'exception. On note donc aussi une absence des options de connectivité chez la carte Arduino Nano. Par exemple, la carte Nano ne propose pas les fonctionnalités Wi-Fi ou Bluetooth embarqués.
- Manque de mémoire : Un second détail qui limite la puissance de la carte Nano concerne la mémoire. S'il est possible pour la carte Nano de supporter un nombre impressionnant de codes, ses limites s'observent au moment de la réalisation de projets liés à la robotique ou aux builds avec des interfaces utilisateurs complexes. Une mémoire de 32 ko est relativement insuffisante pour accomplir ce genre de tâches. À cela, il faut ajouter que certains processus avancés peuvent nécessiter des vitesses plus importantes que celles que peut supporter une horloge calibrée à 16 MHz, soit la vitesse de la Nano.



IV.9.1.5. Présentation de logiciel

L'image est découpée en plusieurs parties :

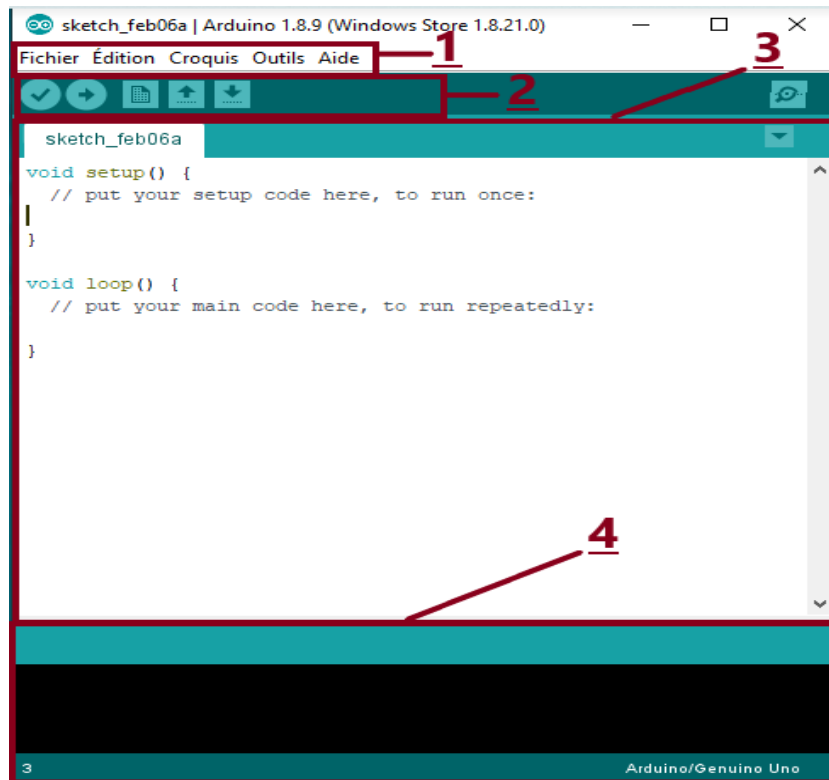


Figure IV.24. Présentation des parties principales du logiciel.

IV.9.1.5.1. Correspondance

- Le cadre numéro 1 : ce sont les options de configuration du logiciel.
- Le cadre numéro 2 : il contient les boutons qui vont nous servir lorsque l'on va programmer nos cartes.
- Le cadre numéro 3 : ce bloc va contenir le programme que nous allons créer.
- Le cadre numéro 4 : celui-ci est important, car il va nous aider à corriger les fautes dans notre programme. C'est le débogueur.

IV.9.1.6. La proche et l'utilisation du logiciel :

La barre des menus est entourée en rouge et numérotée par le chiffre 1.

- Le menu fichier : C'est principalement ce menu que l'on va utiliser le plus. Il dispose d'un certain nombre de choses qui vont m'être très utiles.

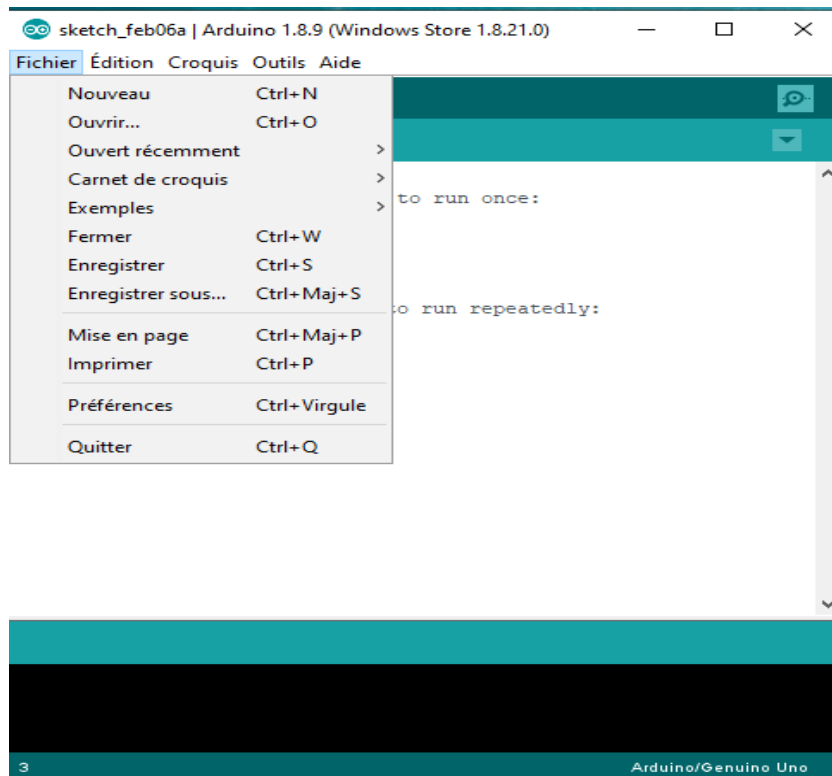


Figure IV.25. Contenu du menue ‘ fichier’.

- Nouveau : va permettre de créer un nouveau programme. Quand on appuie sur ce bouton, une nouvelle fenêtre, identique à celle-ci, s'affiche à l'écran.
- Ouvrir : avec cette commande, nous allons pouvoir ouvrir un programme existant
- Enregistrer / enregistrer sous... : enregistre le document en cours / demande où enregistrer le document en cours.
- Exemples : ceci est important, toute une liste se déroule pour afficher les noms d'exemples de programmes existants.

Le reste des menus n'est pas intéressant pour l'instant, on y reviendra plus tard, avant de commencer à programmer.

IV.9.1.7. Les boutons

À quoi servent les boutons, encadrés en rouge et numérotés par des chiffres ?

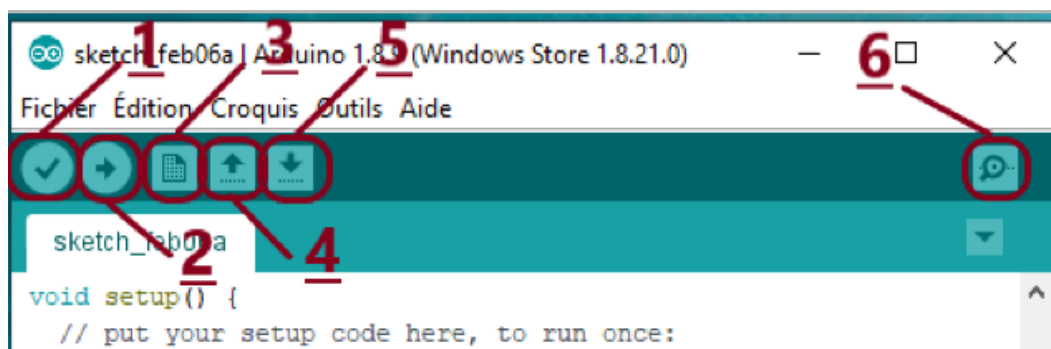


Figure IV.26. Présentation des boutons.



- Bouton 1 : Ce bouton permet de vérifier le programme, il actionne un module qui cherche les erreurs dans votre programme.
- Bouton 2 : compiler et téléverser / télécharger le programme sur la carte Arduino.
- Bouton 3 : Créer un nouveau fichier.
- Bouton 4 : Charger un programme existant.
- Bouton 5 : Sauvegarder le programme en cours.
- Bouton 6 : Moniteur Série : outil d'Arduino IDE vraiment pratique permettant de voir les messages que le programme Arduino peut envoyer sur le port série avec l'instruction `serial.println ()`.



V. 1. Introduction

La réalisation du quadri-rotor a passé par plusieurs étapes, on premier lieu on a fait le choix de matériel utilisé pour la structure mécanique et toute les étapes de la construction, puis on a testé les composants chacun seul nécessitant des modifications supplémentaires avant de les connecter ensemble, ensuite on a fait monter le 1^{ère} moteur, le 2^{ème}, le 3^{ème} et le 4^{ème}, après on a utilisé le PID, ce mécanisme pour contrôler un moteur sans balais afin de calibrer le drone. On a mis les moteurs sur une balance et calculera l'angle à l'aide du MPU6050. Donc la valeur que on va contrôler est l'angle d'inclinaison. En fin on a ajouté la communication.

V. 2. Montage

V.2.1. Teste le MPU6050 :

Le MPU6050 s'agit d'un circuit intégré comportant un accéléromètre trois axes et un gyromètre trois axes avec un convertisseur A/N 16 bits. Il possède aussi une unité de traitement du signal pour filtrer les signaux et pour faire des calculs de position et d'orientation (Digital Motion Processor).

L'objectif est de voir comment fonctionner l'accéléromètre et le gyroscope de l'MPU6050 avec un arduino et comment récupérer les donner sur processing. Pour ce faire, il faut :

- Arduino nano + logiciel 1.8.12 + câble USB.
- Logiciel processing 3.5.4.
- MPU6050.
- Platine d'essai.
- Pc.
- Fer à souder + étain.
- Des fils.

Note : le processing est une interface graphique utilisé pour afficher les valeurs de l'accéléromètre et le gyroscope.

On a deux connecteurs séparés, il y en a deux sortes, comme ça on peut souder se quand veut.



Figure.V.1. MPU6050 avec ces deux broches.

Etape 1 : souder la broche droite avec le MPU6050.

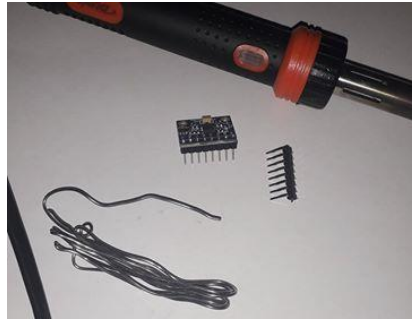


Figure.V.2. La soudure de la broche droite avec le capteur.

Etape 2 : mettre la carte arduino nano et le MPU6050 sur la platine d'essai.

Etape 3 : câbler l'arduino nano avec le MPU6050.

Les connexions :

- la broche VCC du capteur avec celle de la carte.
- le GND du capteur avec celle de la carte.
- la broche SCL du capteur est connectée à la broche A5 de l'arduino.
- la broche SDA à la broche A4 de la carte.
- la broche INT du capteur est connectée à la broche numérique 2 de la carte.

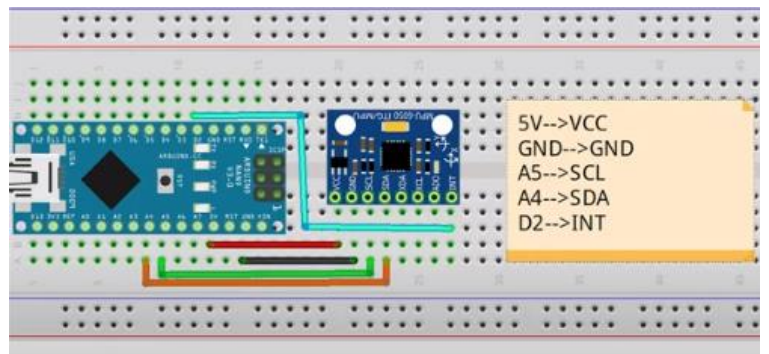
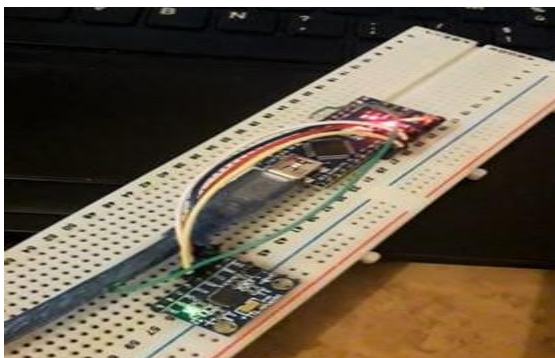


Figure.V.3. Les connexions entre la carte Arduino et le MPU6050.

Etape 4 : lancer le programme en Arduino et en Processing.

Après quelques instants le capteur affiche des valeurs dans le moniteur série.

Etape 5 : jouer avec le central inertiel en la bougeant dans tous les sens.

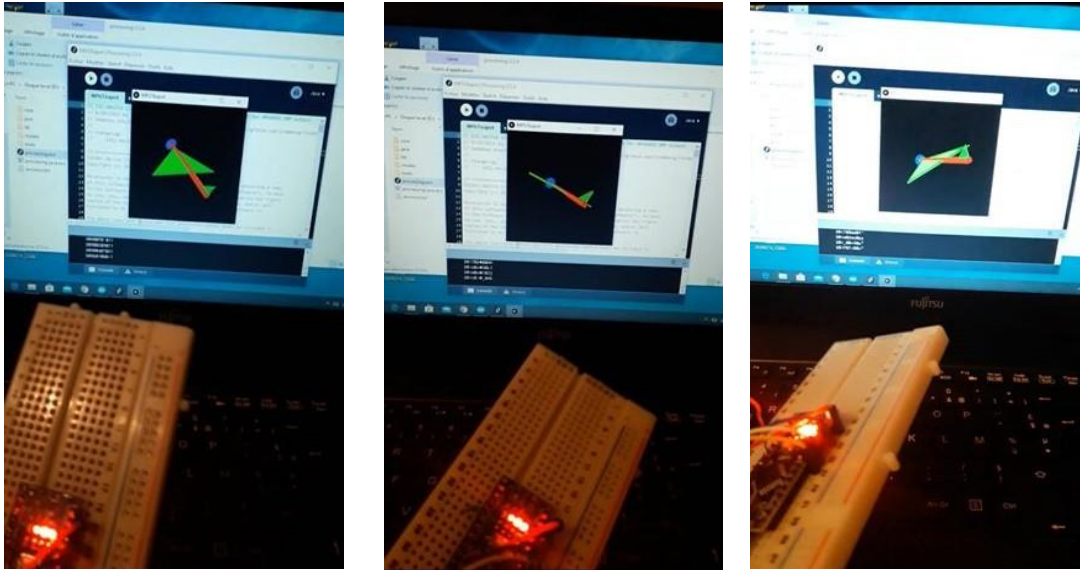


Figure.V.4. Resultat de test en Processing.

Vers le haut vers la droite vers la gauche

V.2.2. Test du moteur :

On a un moteur brushless outrunner avec les spécifications suivantes: il a un KV de 1804 2400, il peut être alimenté avec une batterie LiPo 2S, 3S ou 4S et il nécessite 10A ESC. La valeur KV sur un moteur sans balais définit le régime du moteur par volt sans charge.

Note : Le nombre «S» d'une batterie LiPo indique le nombre de cellules de la batterie, et chaque cellule a une tension de 3,7V.

D'un côté l'ESC a trois fils qui contrôlent les trois phases du moteur et de l'autre côté il a deux fils, VCC et GND, pour l'alimentation.

L'objectif est de faire tourner un moteur brushless à l'aide d'Arduino et ESC et joystick. Pour ce faire, il faut :

- Arduino nano + logiciel 1.8.12 + câble USB.
- Platine d'essai.
- Pc.
- Joystick.
- ESC.
- Des fils.
- Fer à souder + étain.

Etape 1 : placer la carte Arduino et le joystick sur la platine d'essai.

Etape 2 : Assemblage entre le moteur brushless et l'ESC.

Etape 3 : câbler Arduino avec ESC.

Etape 4 : câbler l'ESC avec l'alimentation.



Figure.V.5. Câblage de l’ESC avec le moteur et la carte Arduino.

Etape 5 : câbler le joystick avec Arduino.

Connexions

- La broche GND de joystick avec celles de la carte.
- La broche 5 V de joystick avec celles de la carte.
- La broche VR_x de joystick à la broche A0 de la carte.

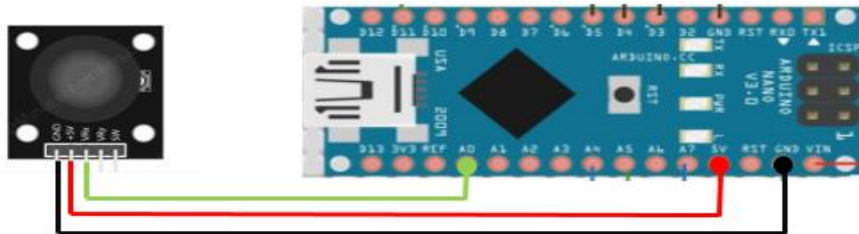


Figure.V.6. Les connexions entre le joystick et la carte Arduino.

Etape 6 : cabler Arduino avec le pc puis lancer le programme.

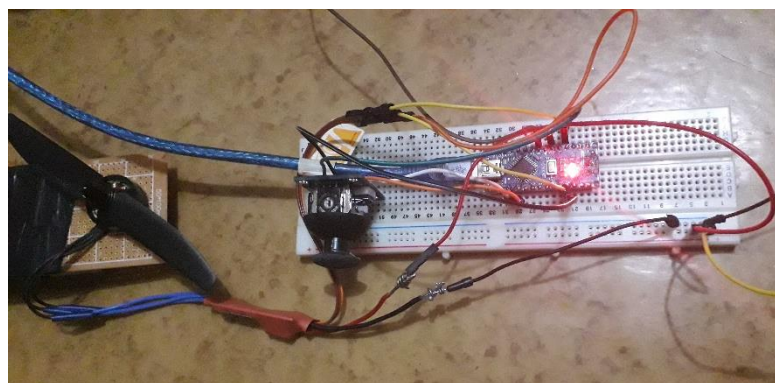


Figure.V.7. Le montage après le lancement du programme.

Etape 7 : bouger le joystick vers le haut.

Résultat :

Le moteur fonctionne très bien.

De la même manière, on test les d'autres 3 moteurs.

V.2.3. Montage de deux moteurs :

On a monté précédemment un moteur avec un joystick, maintenant on va voir comment monter deux moteurs avec deux joysticks.

Le même montage précédant, on rajoute un moteur et un joystick comme ce si :

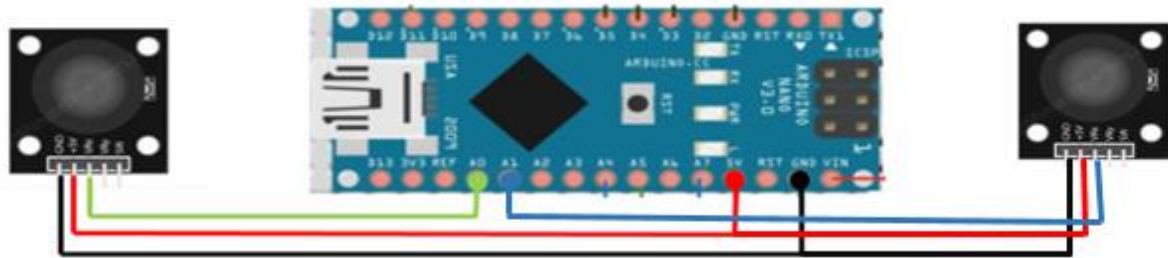


Figure.V.8. Les connexions entre les deux joystick avec la carte Arduino.



Figure.V.9. cablage du 2éme joystick avec la carte Arduino et le 2éme moteur.



Figure.V.10. Le montage avant de lacer le programme.

On bouge les deux joystick



Résultat : les deux moteurs fonctionnent très bien.

V.2.4. Montage de MPU6050 avec les deux moteurs

Le même montage précédant, on place le capteur sur la platine d'essai, les connexions ne changent pas, comme on a fait quand on a testé la central inertiel.

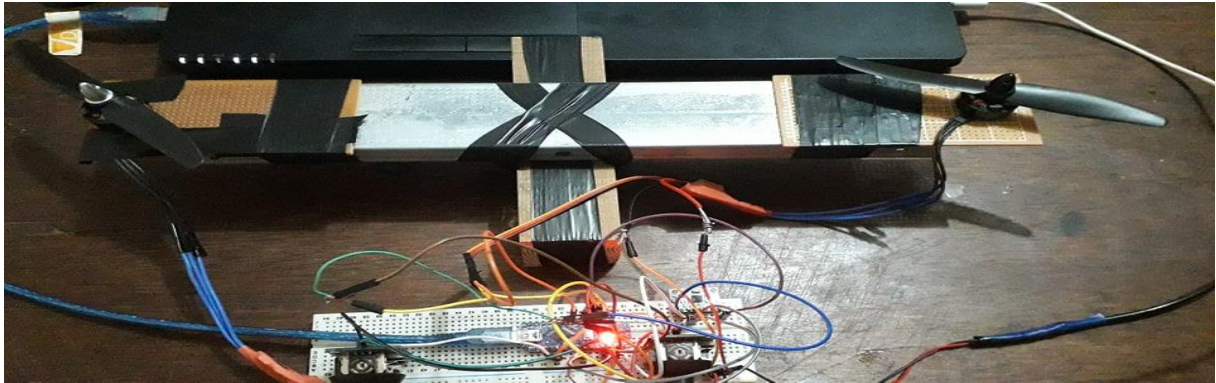


Figure.V.11. le placement du MPU6050.

- Câbler l'Arduino avec le PC.
- Lancer le programme.
- Faire bouger les deux joysticks pour balancer les deux moteurs.

Après quelque instant le capteur affiche les valeurs dans le moniteur série

Résultat : les deux moteurs fonctionnent très bien et le capteur donne meilleur résultat



Conclusion général

Le quadri-rotor est l'un des mini drones les plus populaires et séduisant de part son élégance et sa dynamique. Par conséquent, il a attiré l'attention et est devenu le sujet de recherche de plusieurs équipes et laboratoires ces dernières années. Ce drone est un système complexe, non linéaire, multi variables, instable et présente une dynamique fortement couplée, ce qui a fait de sa commande un grand défi.

On a commencé le travail par un bref historique sur les quadri-rotors avec leur classification, et réglementation, les derniers projets de recherche traitant ce sujet ainsi que leurs champs d'application.

Ensuite, on a décrit les mouvements de base du quadri-rotor, et donné son modèle dynamique par le formalisme de Newton-Euler. Puis le modèle a été modifié en adoptant des hypothèses simplificatrices afin de faciliter la synthèse des lois de commande.

En ce qui concerne la commande, on a présenté le schéma de la commande PID appliqué au quadri-rotor, c'est commande qui assure la stabilisation de quadri-rotor en vol stationnaire.

Nos objectifs pour la conception et la construction du quadri-rotor étaient ambitieux, mais à cause du **covid-19**, on n'a pas eu l'opportunité pour terminer ce travail.

**Reference:**

- [1] https://fr.wikipedia.org/wiki/Gyroplane_Breguet-Richet.
- [2] https://fr.wikipedia.org/wiki/George_de_Bothezat.
- [3] https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89tienne_%C5%92hmichen.
- [4] Nicolas ACHOTTE, ‘‘ Conception, optimisation et dimensionnement de moteurs planaires à aimants permanents pour drones miniatures en vol stationnaire’’, Grenoble, France, le 30 septembre 2005.
- [5] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Drone>.
- [6] <https://www.maddyness.com/2019/03/04/lage-dor-des-drones-des-pionniers-aux-projets-aeronautiques-des-plus-ambitieux/>.
- [7] A. Tayebi and S. McGillvray, "Attitue Stabilization of a VTOL Quadrotor Aircraft", IEEE Transaction On control System Technology pp.562-571,May 2006.
- [8] EL KHAOUDI Samir , OUARGA Mohammed , LI Jiajun, ESETDrone, FSI UPS TOULOUSE 3 EEA ESET, France, 2016
- [9] G, Romeo, G, Frulla, and E, Cestino, Design of a high-altitude long-endurance solar-powered unmanned air vehicle for multi-payload and operations Proc. IMechE Vol. 221 Part G: J. Aerospace Engineering 2007
- [10] Tarek Hamel, Philippe Souères, Modélisation, estimation et contrôle des drones `a voilures tournantes : Un aperçu des projets de recherche français, Toulouse, France.
- [11] H.Bouadi, M.Bouchoucha, Modelling and stabilizing control laws Design Based On Back stepping for an UAV type-quadrotor
- [12] H. Bouadi, M. Bouchoucha, and M. Tadjine ‘‘Modelling and Stabilizing Control Laws Design Based on Sliding Mode for an UAV Type-Quadrotor’’ Engineering Letters, London, England, Vol. 15, No. 2, pp. 15-24, 2007
- [13] H. Bouadi, and M. Tadjine ‘‘Nonlinear observer design and sliding mode control for four rotors helicopter’’ Proceedings of World Academy of Science, Engineering and Technology, Venise, Italy, Vol. 25, pp. 225-230, 2007.
- [14] H. Bouadi, M. Bouchoucha, and M. Tadjine ‘‘Sliding Mode Control Based on Backstepping Approach for an UAV Type-Quadrotor’’, International Journal of Applied Mathematics and Computer Sciences, Barcelona, Spain, Vol. 4, No. 1, pp. 12-17, 2007.
- [15] Heba talla Mohamed Nabil ElKholy, Dynamic Modeling and Control of a Quadrotor Using Linear and Nonlinear Approaches.